

2020 年度

修士論文

光学センサとマイクロ波センサデータを用いた
モンゴル草原植生の空間分布パターンの解明

Detection of the spatial distribution pattern of Mongolian grassland
vegetation using optical and microwave satellite

21931002 島 溪太

Keita Shima

指導教員 国際環境情報学 教授 星野 弘方

酪農学園大学大学院酪農学研究科

目次

目次

表目次

図目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.1.1	モンゴル国の概要	1
1.1.2	モンゴル国の景観の特徴	2
1.1.3	ゴビ砂漠の特徴	6
1.2	本研究の目的	7
第 2 章	研究手法	8
2.1	研究対象地の概要	8
2.2	現地調査	11
2.2.1	各植生調査地の概要	11
2.2.2	各植生調査サイトの景観	11
2.2.3	植生調査	17

2.2.4	植生の植物量 (Volume of biomass)	18
2.3	衛星画像の解析	19
2.3.1	光学センサを用いた解析手法	19
2.3.1.1	NDVI の算出	21
2.2.1.2	灌木類のチューリングパッチパターンの形成	21
2.2.1.3	半湿潤, 半乾燥地に於けるパッチパターンの変移	24
2.2.1.4	パッチパターンと壊滅的生態系シフトのレジームシフト	26
2.2.1.5	NDVI による植生パッチパターンのモデルリング .	29
2.3.2	マイクロ派衛星を用いた解析手法	30
2.3.2.1	Sentinel-1 の SAR.....	32
2.3.2.2	後方散乱係数	34
2.3.2.3	Sentinel-1 の衛星画像の解析手法	37
第 3 章	結果と考察	38
3.1	現地調査の結果	38
3.1.1	植生のバイオマス (Volume of biomass) の特性	38

3.1.2	各植物種のバイオマスの特性	39
3.1.3	各サイトに於ける NDVI	44
3.2	光学センサ，植生パッチパターン	46
3.2.1	一年生植物，多年生植物の NDVI の違い	46
3.2.2	NDVI のパッチパターンモデル	47
3.3	マイクロ波合成開口レーダー	50
3.3.1	後方散乱係数，NDVI を用いた解析	50
3.3.1.1	各サイトに於ける，両季節の後方散乱係数	51
3.3.1.2	後方散乱係数と NDVI の関係（プロットスケール）	52
3.3.1.3	後方散乱係数と NDVI の関係（サイトスケール） ..	55
3.3.2	後方散乱係数と土壌水分の関係	58
3.3.2.1	土壌水分量現地測定	60
3.3.2.2	現地計測の土壌水分量と後方散乱係数との関係 ...	61
3.3.3	合成開口レーダーの結果のまとめ	63
3.4	空間分布特性	64
3.4.1	バリオグラムモデル	64

3.4.2	セミバリオグラムのモデル	67
3.4.3	セミバリオグラムの結果 (NDVI)	70
3.4.4	セミバリオグラムの結果 (後方散乱係数)	76
第4章	まとめ	82
4.1	マイクロ波衛星後方散乱係数の傾向	82
4.2	セミバリオグラム・データの距離との関係	83
4.3	光学センサを用いた植生パッチパターンの解析	83
4.4	モンゴル国の土地利用と環境問題	84
Abstract	86
謝辞	91
参考文献	92

表 目 次

Table.1 Specifications of the Sentinel-2 sensors	20
Table.2 Specifications of the Sentinel-1 satellites	31
Table.3 List of plant species identified in field surveys. . .	42
Table.4 Backscattering coefficient of each region in Mongolia and Japan.....	50

图 目 次

Fig.1 Photographic of differences landscape in each study sites	5
Fig.2 (a) Map of the altitude of Mongolia. (b) Map of annual precipitation and location of study sites, where, the precipitation amount of blue is higher, the red color is lower)	9
Fig.3 Average annual temperature and annual precipitation of each site. (Where, the highest rainfall is 301 mm for Ulaanbaatar and 38 mm for lowest Tsogt-Ovoo)	10
Fig.4 Photograph of the survey site on summer (September, 2019).	15
Fig.5 Photograph of the survey site on spring (May, 2019)....	16
Fig.6 The design of sites and plots of field survey.....	17
Fig.7 Turing Patchiness Pattern (Hardenberg et al, 2001) ...	25
Fig.8 Model showing how ecosystems may undergo a predictable sequence of emerging self-organized patchiness as resource input decreases or increases (Rietkerk et al, 2004)	27
Fig.9 Collapse of ecosystem networks in semi-arid areas. (where,	

(a) is a state where the ecosystem network is stable, and
 (b) is a state where the ecosystem network is unstable)
 28

Fig.10 Satellite image (250 m² scale) acquired from the optical
 sensor Sentinel-2. (Where, (a) is a R-G-B color
 combination image, (b) is an NDVI image) 29

Fig.11 Differences between the optical sensor Sentinel-2 and the
 microwave satellite Sentinel-1. (where, (a) is an image
 obtained from Sentinel-2, and (b) is an image obtained
 from Sentinel-1) 33

Fig.12 Occurrence of microwave and backscatter on dry ground
 surfaces. Where, in (a), the ground surface is smooth and
 backscattering is unlikely to occur; in (b), the ground
 surface roughness interferes with microwaves and
 backscattering occurs; and in (c), the plant interferes
 with the microwave and causes backscattering 36

Fig.13 Occurrence of microwave and backscatter on moist ground
 surfaces. Where, in (a), water in the soil interferes with
 microwaves, causing backscattering; and in (b) is since
 radio waves are specularly reflected on the water surface,
 backscattering does not occur 36

Fig.14	Plant changes of site9-site6 in summer season (2019)	38
Fig.15	Changes of annual plants, biennial plants, perennial plants and hrubs in summer season (2019)	40
Fig.16	Photographic of <i>Allium mongolicum</i> in field	40
Fig.17	Photographic of <i>Caragana leucophylla</i> in field	41
Fig.18	Photographic of <i>Neopallasia pectinata</i> in field	41
Fig.19	The leaf scale NDVI calculated from ASD FieldSpec® in field surveys in site9-site6 on the summer and spring season (2019)	44
Fig.20	The changes of monthly precipitation and monthly temperature for site9-site1 during 2007-2016.	45
Fig.21	Differences between annual plants and perennial plants of NDVIs at each site in summer season (2017)	46
Fig.22	Simulation results of dimensionless biomass (NDVI) along a gradient of decreasing water stress (precipitation) for (UB) - Ulaanbaatar; (MG)-Mandal-Gov; (DZ)-Dalanzadgad; and (T0)-Tsogt-Ovoo based on simplified equation (1) and (2). To refine the representation of biomass transport, the diffusion term in the P equation is replaced by a convolution of a dispersion kernel and standing biomass, defining the seed rain about a parent plant	48

Fig.23 Differences in the generated of NDVI patchiness in steppe and deserts area	49
Fig.24 Backscattering coefficient changes of site9-site6 in summer and spring season (2019)	51
Fig.25 Linear correlation graph of backscatter coefficient and NDVI (Where, (a) on spring season (2019) ; and (b) on summer season (2019)	53
Fig.26 The extraction method of the backscattering coefficient at plots and fields sites scale (Where, (a) is when extracted on the plot(10 m^2) \times 5 scale, and (b) is when extracted on the site(250 m^2) scale)	54
Fig.27 Linear correlation graph (site scal) of backscatter coefficient and NDVI (Where, (a) on spring season (2019)and (b) on summer season (2019)	57
Fig.28 Explanatory drawing of the method of determining soil moisture content and backscattering coefficient using roughness factor (Nakaegawa et al, 1998)	59
Fig.29 Soil moisture changes of site9-site6 in summer and spring seasons (2019).	60
Fig.30 The linear correlation between the backscatter coefficient and soil moisture (Where, (a) in spring season (2019);	

(b) in summer season (2019))	62
Fig.31 Two points x and $x + h$ separated by the distance vector h in region A (Kohsaka, 1998)	66
Fig.32 Variogram cloud: The degree of difference with respect to the spatial distance h is plotted (Kohsaka, 1998) ..	66
Fig.33 Semivariogram structure.....	68
Fig.34 Four types of models in the semivariogram.....	69
Fig.35 (a) the estimation result of NDVI based on the measurement data; , and (b) is a semi-variance of NDVI estimation in spring season (2019)	73
Fig.36 (a) the estimation result of NDVI based on the measurement data; and (b) is a semi-variance of NDVI estimation in summer season (2019)	75
Fig.37 (a) the estimation result of dB based on the sites satellite data, and (b) is a semi-variance of dB estimation in spring season (2019)	79
Fig.38 (a) the estimation result of dB based on the site satellite data, and (b) is a semi-variance of dB estimation in summer season (2019)	81

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 モンゴル国の概要

モンゴル国はユーラシア大陸の東部に位置する内陸国である。北緯 $41^{\circ} 32' - 52^{\circ} 6'$ 、東経 $87^{\circ} 47' - 119^{\circ} 54'$ に位置し、国土面積は約 156.5 万平方 km、平均海拔高は 1580m、年降水量はおよそ 200mm であるが、北・東西間でばらつきが大きい (Sodnomet, 1990)。年降水量は北部から南部にかけて減少する傾向があり、北部に比べ南部では降水量の年々変動も大きい (Enis, 1995)。気候は典型的な大陸性のステップ気候となっており、降水量が少なく、夏と冬の気温差（年較差）や昼と夜の気温差（日較差）が大きい特徴がある。

モンゴル高原では古来より有蹄類の家畜の餌となる草を求め、移動式住居（ゲル）とともに移動する遊牧を行うことにより、草原、乾燥草原に於ける資源を持続的に利用して生活していた。遊牧はモンゴル国に於ける基幹産業であり、降水が空間的にも時間的にも不均質な乾燥草原 (Munkhtsetseg et al, 2007) に適した土地利用であり、土地劣化を引き起こしにくく、遊牧民の生計を支える機能を有する (Scoones, 1993)。現在まで継続されてきた遊牧は、時代の変化に時折翻弄されてきた。モンゴル国は 1990 年、社会主義国家から民主主義国家に転換した。それ以前の遊牧は計画経済下で牧畜業を集団化、家畜頭数の管理をする農牧業共同組合（ネグデル）が管理していたが

(Kazato, 2009) , 市場経済への移行に伴い解体された。家畜頭数を管理する体制が崩壊したことによる家畜頭数の増加や、近年の市場経済の発展に伴う土地利用の変化、牧民の移動性の低下による土地の劣化が懸念されている。土地の劣化が進行すれば、モンゴルの基幹産業の遊牧は崩壊し、多くの遊牧民が職を失う経済的問題を引き起こしかねない。また、モンゴル国のステップ気候は降水量が少ないため、広大な草原地帯で一度砂漠化が進行すると、その後回復が難しいことに加え、近年頻繁に起こっている乾燥化・温暖化などの気候変動の影響を受けやすく非常に脆弱な地域である。気候変動によりユーラシアの大陸内部はより乾燥化する傾向があることが示されている (Okamoto et al, 2001) 。ここ数十年間の世界的な気候変動と過放牧により、モンゴル国に於いても、草原の退化は進行しているとの報告がある (Kawamura et al, 2005) 。

1.1.2 モンゴル国の景観の特徴

一般的にモンゴル国は、草原が一様に広がっている印象が強いが、各地の降水量の違いに伴い景観は大きく異なる。植物の景観生態学的特徴として、一部の高山や北部の山岳地帯に分布する森林、及び南部の砂漠地帯を除くと、国土面積のおよそ80%は草原ステップが占め、北から南にかけて変化する降水量と気温の勾配に沿って緯度的にほぼ

平行に，森林ステップ，ステップ，砂漠ステップと姿を変え（Yunatov, 1976），南端にはゴビ砂漠が広がる．具体的に説明すると，北部の湿潤地域（Humid）の森林ステップ（Forest steppe）は年間降水量約400mm～300mm程度の高原状で，寒さに強い針葉樹林が多く生育する水資源が豊富な土地である．主に山頂上付近や北向き斜面にカラマツとシラカンバなどの森林が成立し，南向き斜面は草原となっている．モンゴル国では「ハンガイ」と呼ばれている．半湿潤地域（dry sub-humid）のステップ（Steppe）は年間降水量約300mm～200mm程度であり，種子から発芽して一年以内に生長し，開花・結実，種子を残して枯死する一年生植物の草本類（an annual plant）が優先する草原が広がる．モンゴル国では「ヘールタル」と呼ばれている．これらの地域の気候は年中乾燥し，極度寒冷な冬と，比較的湿潤で冷涼な夏を特徴とする．中部の砂漠ステップは半乾燥地（Semi-arid）とも呼ばれ，年間降水量約200mm～150mm程度であり，多年生植物（Perennial plant）の草本類に加え，灌木類が斑状（パッチ状）に生育している．一年生植物の草本類は，灌木どうしの間を埋めるように分布しているがステップ程多く被覆せず裸地が見える状態である．この地域の気候は年中強い乾燥と強風を特徴とし，ステップと砂漠との中間に位置する景観である．さらに南下すると年間降水量約100mm以下の砂漠（Desert）の乾燥地域（Arid land）が広がっている．このゴビ砂漠ではパッチ状に生育する灌木類も存在するが，さらに降水量が少ない地域では，灌木

のパッチや草本類のサイズも小さくなり裸地が優先する景観となる．気候は極めて強い乾燥と強風を特徴とし，モンゴル国では「草が少なく，乾燥した土地」という意味を含む「ゴビ」と呼ばれている．このように，ゴビ砂漠と比較して降水量が多いステップでは一年生植物が優先し，草丈が低くなだらかな景観がみられるが，ゴビでは多年生植物の灌木類がパッチ状に点在している景観がみられる．各景観の様子はFig.1に示す．

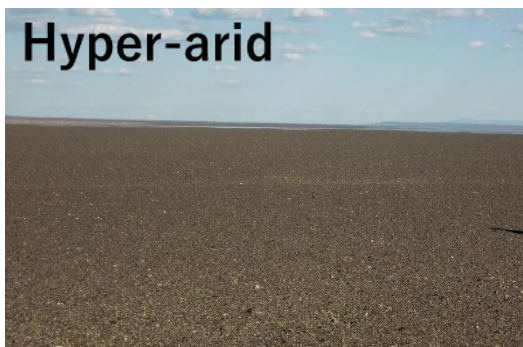


Fig.1 Photographic of differences landscape in each study sites.

1.1.3 ゴビ砂漠の特徴

ゴビに多く生育する多年生植物は、複数年に渡って同じ株から成長し生存する植物のことである。種子が発芽してから枯死するまでの期間が決まっておらず、条件さえ良ければ永続的に生き続けることが多い。また、乾燥地特有の季節変動の激しい降水に適応した生理生態特徴を持ち、種の多様性が低い砂地に点在して(パッチ状)分布する植生群落を形成していると報告されている。その中でも特に一年生植物は降水量に敏感であり多年生植物は根を深く張って土壌深層水、または地下水まで吸い上げて利用することから降水量が少ない年でも生き残ることができる特徴を持っている(Hilbig et al, 1995)。ゴビのような乾燥・半乾燥地域の生態系は非常に脆弱であるため、草原への負担を最小限に抑える遊牧業が従来行われてきた(Sofue, 2015)。モンゴルの遊牧で用いる五種類の家畜を五畜(タワンホショーマル)と呼び、ウマ・ヒツジ・ヤギ・ウシ・ラクダで構成されている。ゴビはヤギやラクダが主に飼育されている地域である(Nakamura, 2020)。このように植生の景観生態学的特徴がステップとゴビでは異なるため、土地の劣化に係るモニタリングに於いて、各景観的特徴の違いを考慮して行う必要がある。よって各景観的特徴や植生の分布パターンを定量的に明らかにし、生態系が脆弱なゴビのような地域の植生状態のモニタリングを継続して行う必要がある(Sofue et al, 2018)。

1.2 本研究の目的

自然植生の分布はその地域の気温と降水の特徴，および植物の生理生態特性を反映している．今後経済の発展に伴う土地利用の変化が懸念されるモンゴル国に於いて，広域に於ける景観の違いを定量的に評価することは重要となるが，それらの研究事例は多くない．したがって，本研究では光学センサ・及びマイクロ波センサ衛星のデータを用いたリモートセンシング技術及びフィールド科学の視点から，広域に於ける景観的特徴と植生分布パターンを解明することを目的とする．

第 2 章 研究手法

2.1 研究対象地の概要

研究対象地は、北部の半湿潤地域のトゥブ県（モンゴルの行政区分の呼称では、日本の「県」は「アイマグ」に相当する．ここでは「県」と表記する）、首都ウランバートル（Ulaanbaatar）（年間降水量約 300mm）、半乾燥地域のドンドゴビ県の都市マンダルゴビ（Mandalgovi）（年間降水量約 150mm）、南部の乾燥地域（ゴビ砂漠）のウムヌゴビ県の都市ツォグトオボー（Tsogt-ovoo）（年間降水量約 100mm 以下）、ダランザドガド（Dalanzadgad）（年間降水量約 150mm）．これらの地方都市周辺で行った．なお、調査地の選定は、調査の効率や日程を考慮したうえで設置している．Fig.2 は対象地に於ける降水量の分布と 2007 年～2016 年の実測年降水量及び年平均気温を Fig.3 に示した．

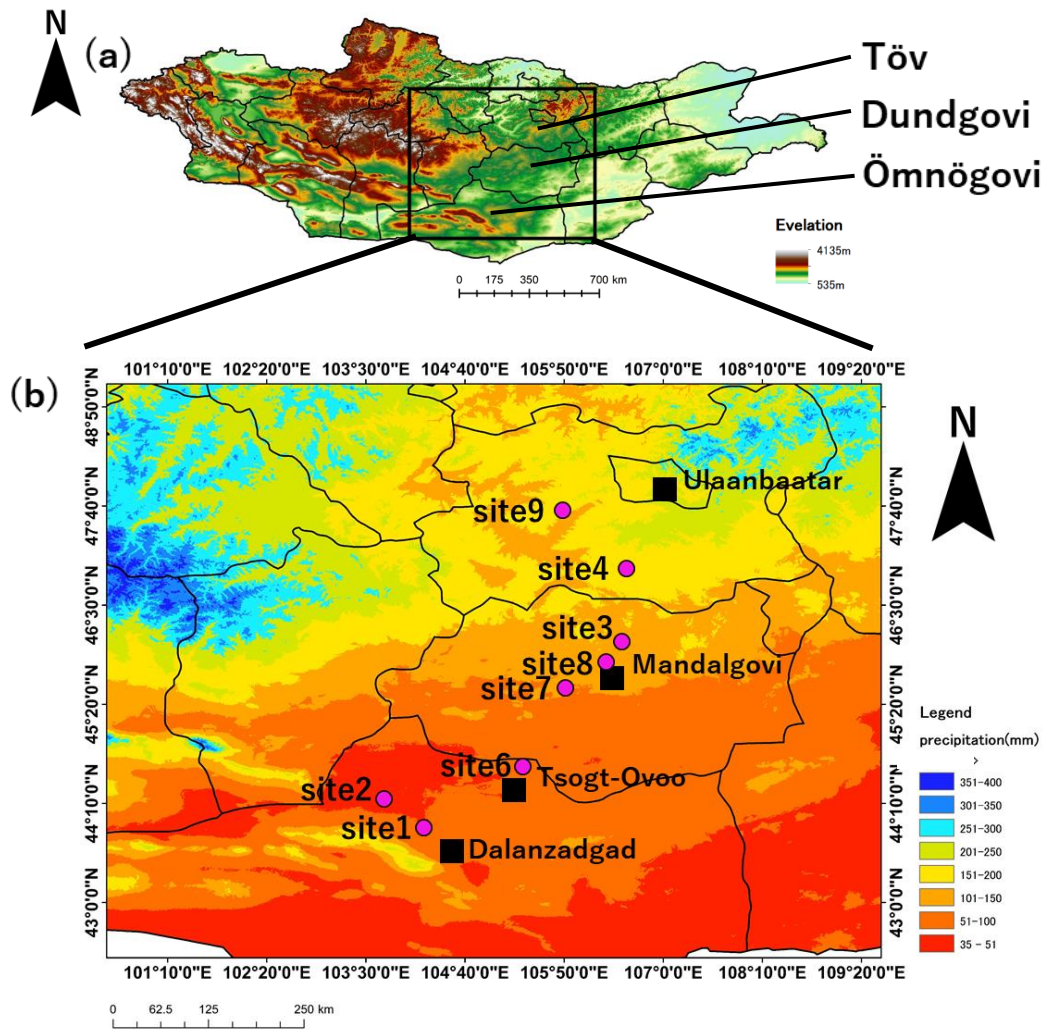


Fig.2 (a) Map of the altitude of Mongolia. (b) Map of annual precipitation and location of study sites, where, the precipitation amount of blue is higher, the red color is lower).

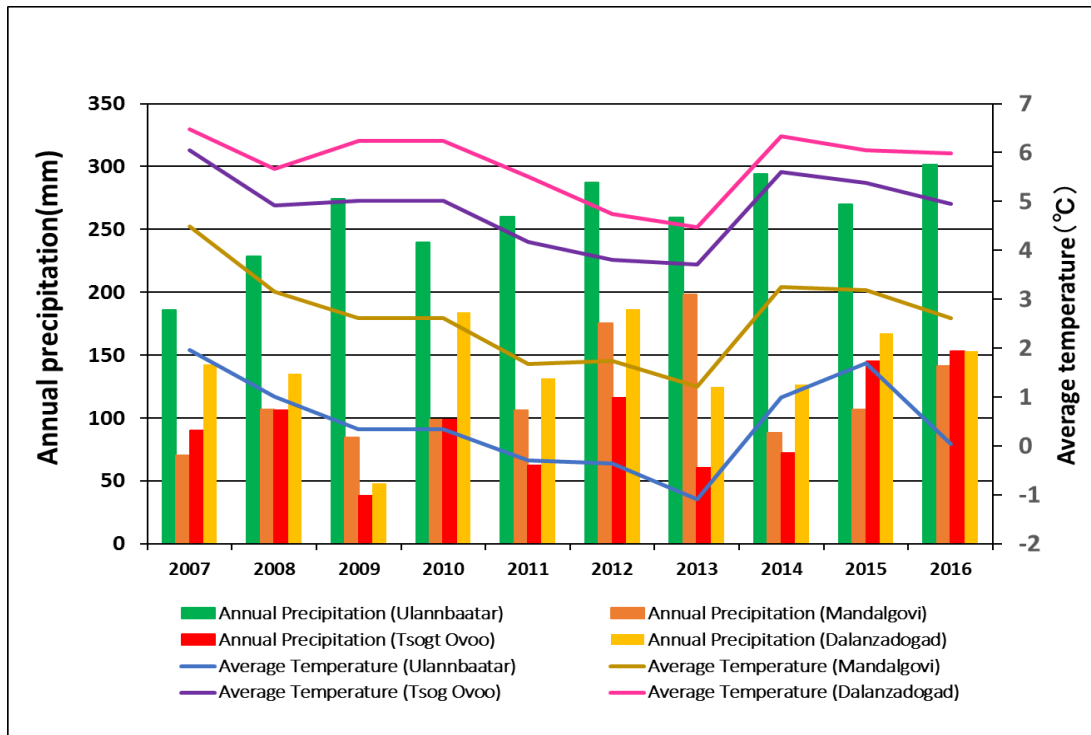


Fig.3 Average annual temperature and annual precipitation of each site. (Where, the highest rainfall is 301 mm for Ulaanbaatar and 38 mm for lowest Tsogt-Ovoo).

2.2 現地調査

2.2.1 各植生調査地の概要

各地域に於ける景観生態学的特徴を定量的にフィールド検証するべく、春季の発芽期間（3月～5月まで）と夏季の成長期間（6月～9月まで）に於いて現地植生調査を実施した。調査はそれぞれ2017年8月、2018年4月、2019年4月、2019年8月の夏季二回、春季二回実施している。調査サイトは北部のステップから南部のゴビ砂漠までの各景観、降水量の区分に沿い合計8地点（Site1-site9まで）設置した（Fig.1）。なお、調査サイトの番号は現地調査を行った際の設置順となっており、本研究を実施する途中で地理的な要因により調査不可能となったサイトは除いている（例え、Site5）。

2.2.2 各植生調査サイトの景観

ここでは各植生調査サイトの景観的特徴や生育する植物種の様子を具体的に説明する。Site9は首都のウランバートル近郊のホスタイ国立公園内に設置した。ホスタイ国立公園（Hustai National Park）は、モンゴル国トゥブ県に属し、首都オランバートルから南西に約100 kmに位置している。面積は506.2 km²であり、標高1,100m～1,840mと広範囲に渡っている。気候はステップ気候であり、低い降水量から育まれる広大な草原とわずかな森林が存在する。公園内の草原や森林では

モウコノウマ・アカシカ・モウコガゼル・マーモット・ウサギ・ハイイロオオカミや猛禽類が生息する．サイトは東向きのなだらかな斜面沿いに位置し，野生動物による採食の影響を受けない柵の中に設置した．植生は一年生植物，多年生植物からなる草本類が優先する．Site4はトゥブ県南部に位置する．気候はステップ気候の半湿潤地域であるが，灌木類も多く見られる．周辺には遊牧民のゲルやヤギ，ヒツジの家畜類，また春季は前年度の居住の痕跡が確認された．モンゴルでは家畜の増加，牧民の都市や主要道路への集中，定住化などの移動性の低下が過放牧をもたらしている（Fernandez-Gimenez et al, 2004）が，このSite4も同じく過放牧状態であると考えられる．Site3はドンドゴビ県の北部，デルゲルツォグト村の近くに位置する．周辺には大きい湖が数個存在する湿地帯であり，牧畜を営んでいる遊牧民のゲルも数個存在する．一年生植物の草本類が優先し，湿地帯特有の植物も一部含まれている．これらの三つのサイトは半湿潤地域のステップ気候に属する．

Site8はドンドゴビ県の中心都市であるマンダルゴビ周辺に設置した．Site7はマンダルゴビから南に約20 km離れた位置に設置した．この二つのサイトは半乾燥地域の気候区分に属し，多年生植物からなる灌木類がパッチ状に点在する．また灌木のパッチ一つあたりのサイズも大きいのがその特徴である．

Site6はドンドゴビ県との県境沿いに位置するウムヌゴビ県北部の

ツォグトオボー村の周辺に位置する．ツォグトオボーは小さな村だが砂漠研究の拠点となる気象ステーションが存在する．ウムヌゴビ県を中心都市であるダランザドガドより経度的に北部に位置するが，全調査サイトでは年間降水量は 100mm 以下と最も低い．多年生植物の草本類，灌木類のサイズも小さく，裸地が優先する．Site1 はダランザドガド周辺に位置する．ダランザドガドは周辺の鉱山採掘場で働く人が多く共住し，ウムヌゴビ県を中心都市でもある．都市周辺ではラクダを利用した遊牧民も生活している．2018 年度と 2019 年度の衛星画像を比較すると 2019 年度の衛星画像には水が流れていた跡(川の跡地，わじ)が確認できた，これは 2018 年の雨季に川が発生し，調査サイトに生育する植物の多くは流されたと考えられる．そのため 2019 年の 8 月の調査では地中深くに根を張ることができる頑丈な灌木類は残存し，それ以外は，先駆種と思われる一年生植物ヨモギ類の (*Neopallasia pectinata*) が多く生育していた．花粉が大量に飛散していたため，開花期はすでに終わり枯れていた状態だと考えられる．Site2 はダランザドガドから北西に 100 km 離れた場所に位置する．緯度的にはツォグトオボーの Site6 と同等であり，降水量も 100mm 以下ではあるが，周辺に大きな川の跡地が存在するため，雨季には大量の水が流れて，時期によって土壌水分量が高いこともあると考えられる．その影響によりパッチ状に点在する灌木類のサイズも大きく半乾燥地の Site8, 7 に似た景観である．この Site6, 1, 2 の気候区分は乾燥

地の砂漠に属す（Fig.4 と Fig.5）.

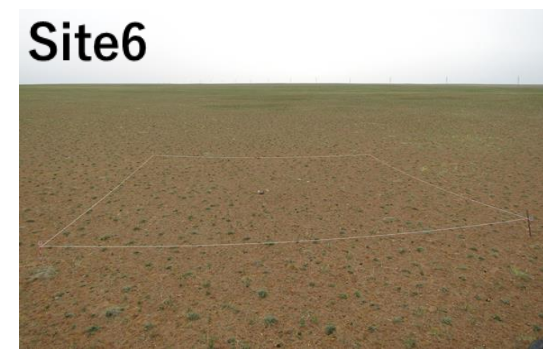
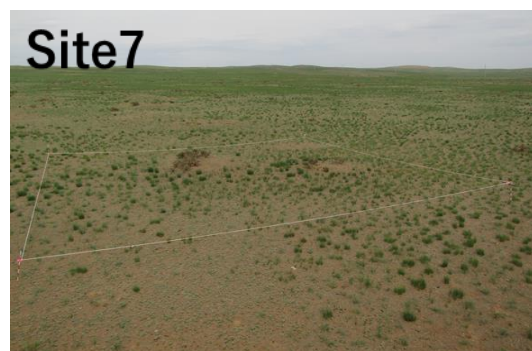


Fig. 4 Photograph of the survey site on summer
(September, 2019).

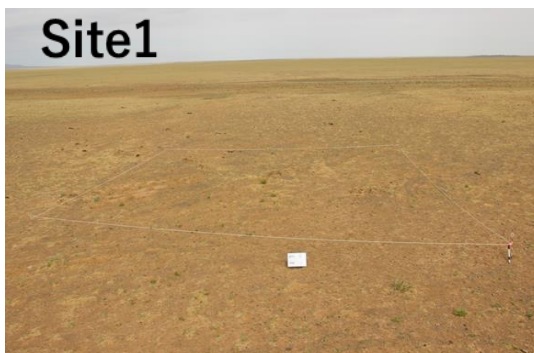
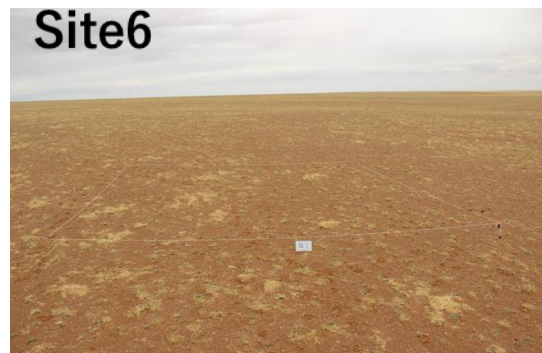
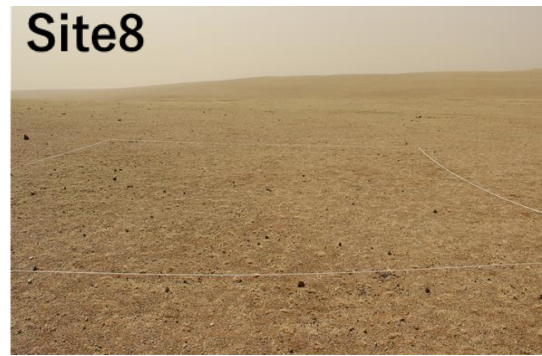
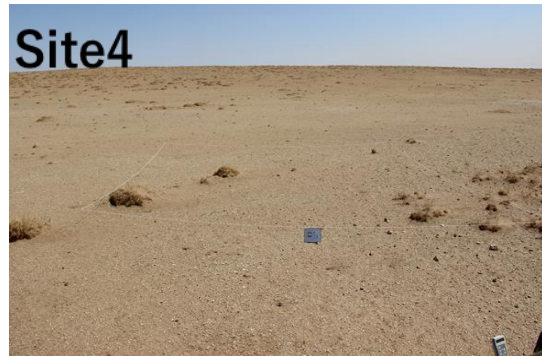
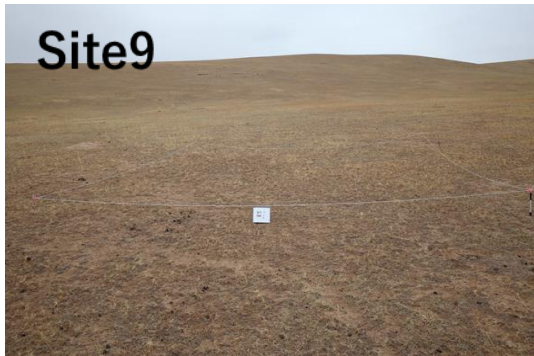


Fig. 5 Photograph of the survey site on spring (May, 2019)

2.2.3 植生調査

現地植生調査では植生コドラート法を用いた．1地点1サイト[250m×250m]四方内に5箇所のプロット(plot)[10m×10m]四方（Fig.6）を設置した．本研究では計8サイト設置したため，計40プロットで植生調査を行っている．調査項目はプロット内の植物の同定（植物種の同定），草丈，植被率の推定，土壌水分の計測，及び分光放射計を用いた裸地，枯草，植物の葉のスケールに於ける分光反射率の測定を行った．土壌水分計測は©Hydro Sense TM，分光反射測定は©FieldSpec HandHeld2 の分光光度計を使用した．

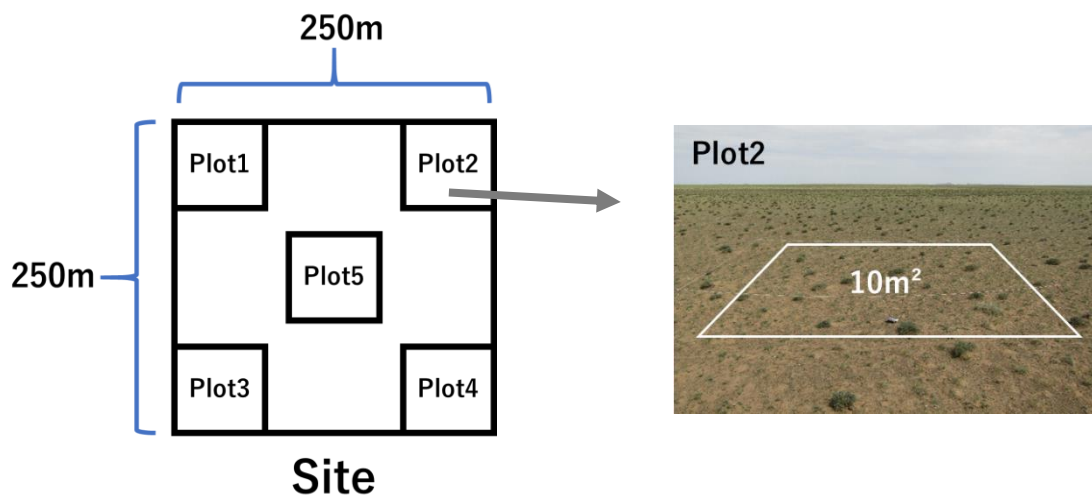


Fig. 6 The design of sites and plots of field survey.

2.2.4 植生の植物量 (Volume of biomass)

本研究ではモンゴルの北部の典型草原ステップから南部のゴビ砂漠まで、春季と夏季に分けて降水量の異なる八地点に於いて植生のバイオマス量として（植物量）を計算した。ここで、プロット内の草丈と植生の被度から以下の式(1)により植物量 (Volume of biomass) を算出した。

$$\text{plant Volume} = (\text{Height of observed plants}) \times (\text{coverage of plants}) \quad (1)$$

2.3 衛星画像の解析

2.3.1 光学センサを用いた解析手法

本研究では、植生の観測にリモートセンシング技術を用いる。光学センサの Sentinel-2 はヨーロッパの地球観測光学衛星で、全部で 12 バンドの観測波長帯を持っている。地上分解能は可視光（近赤外の B8，可視光の赤の B4，緑の B3，青の B2）で 10m，レッドエッジバンドでは 20m，中間赤外領域では 60m となっている。Sentinel-2 の衛星画像は土地被覆変化の把握や環境モニタリングをはじめ、自然災害，農業（作物）の生育状況の把握などリモートセンシングの幅広い分野で活用されている

(<https://www.restec.or.jp/satellite/sentinel-2-a-2-b>).

Table 1 Specifications of the Sentinel-2 sensors .

バンド	中心波長	解像度	観測項目
B1	443nm	60m	エアロゾル
B2	490 nm	10 m	エアロゾル
B3	560 nm	10 m	陸域情報： 土地被覆、植生情報（クロロ フィル量、水分、LAI、fAPAR） 雪/氷/雲、鉱物検知 光合成 有効放射吸収率（fAPAR）
B4	665 nm	10 m	
B5	705 nm	20 m	
B6	740 nm	20 m	
B7	775 nm	20 m	
B8	842 nm	10 m	水蒸気補正 / 陸域情報
B8a	865 nm	20 m	水蒸気補正 / 陸域情報
B9	940 nm	60 m	水蒸気補正
B10	1375 nm	60 m	巻雲の検知
B11	1610 nm	20 m	陸域情報

2.3.1.1 NDVI の算出

本研究では，2019 年 4 月の春季と 2019 年の夏季に於ける Sentinel-2 の衛星画像を用いて NDVI（正規化植生指数）を算出した．NDVI は -1 から +1 の値で植生量や植生の有無，光合成活性状態を示す衛星植生指数の一つである．NDVI は以下の式 (2) で定義される．

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}} \quad (2)$$

ここで，NIR は近赤外域（ $0.73 \mu\text{m} - 1.10 \mu\text{m}$ ）反射率であり，RED は赤色域（ $0.58 \mu\text{m} - 0.68 \mu\text{m}$ ）の反射率である．NDVI の算出には Harris Geospatial Solutions 社の ENVI を使用した．取得した衛星画像は現地調査サイト（ 250 m^2 ）と同じ地点を抽出し算出した．

2.3.1.2 灌木類のチューリングパッチパターンの形成

NDVI を用いてパッチ状に点在する灌木類のモデル図を作成することになるが，ここでは灌木類のパッチパターンの概要について説明する．モンゴルでは年間降水量約 $200\text{mm} \sim 150\text{mm}$ 程度の半乾燥地から 100 mm 以下の南部のゴビ砂漠にかけて，パッチ状に点在する多年生植物の灌木類が見られる．このような分布はモンゴルだけではなく降水量が少ない別の地域の砂漠や高山に於いて同様のパターンが存在する．

このパターンの原型はチューリング・パターン（Turing Pattern）

と呼ばれ、イギリスの数学者アラン・チューリング (Alan Mathison Turing 1912-1954) により 1952 年に理論的存在が示された自発的に生じる空間的パターンである。その後この理論は数理生物学の分野に於いて生物の模様形成、植物の分布パターンの解明に用いられている。植物の分布に於けるチューリングパターンではチューリングが提唱した反応拡散方程式を元に改良されたバイオマス密度のモデル式 (3) (4) に基づき、自発的パターン形成が生じる。この模様の変化をもたらす要因をチューリング不安定と呼ぶ。植物に於いては降水量（水分）がパッチ模様の形成に関わる (Hardenberg et al, 2001)。

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\gamma w}{1 + \sigma} n - n^2 - \mu n + \nabla^2 n \quad (3)$$

$\frac{\gamma w}{1 + \sigma} n$: 乾いた土壌に対する，地下水密度 $w(x, t)$ と直線的に成長する植物の成長速度

μn : 死亡率，動物による採食

n^2 : 限られた栄養状態の飽和度

$\nabla^2 n$: クローン繁殖と種子散布による植物の拡散又は拡大増加

$$\frac{\partial w}{\partial t} = p - (1 - pn)w - w^2 n + \delta \nabla^2 (w - \beta n) - v \frac{\partial (w - \alpha n)}{\partial x} \quad (4)$$

p : 降水量

$-(1 - pn)$: 損失項

$-w^2 n$: 土壌中の水の供給，浸透流速

v : 下り坂の流出速度

$-v \frac{\partial h}{\partial x}$: 地表面の流出

$h = w - \alpha n$: 水分依存の成長項

2.3.1.3 半湿潤，半乾燥地に於けるパッチパターンの変移

前項で説明した通り，バイオマス密度のモデルの式（3）（4）に基づき植生のパッチパターンは形成される．パターン変化をもたらす要因（チューリング不安定）は降水量となる．Fig7 は気候区分の景観（降水量）の違いに於ける空間平均バイオマス（パッチパターン）の変移を表した図である．横軸の p は降水量，縦軸の $\langle n \rangle$ は平野景観に於ける空間平均バイオマスである．これは，空間的に平均化されたバイオマス n を降水量 p の関数として示している．モデルはすべて一定の降水量 p 値に対して均一な裸地状態（植生が無い状態）を含む．臨界値 p_c より低い降水量で裸地状態は安定する（実線）．この臨界値 p_c を超えると裸地状態が不安定になり（破線）新しい状態が表示される（線 γ ）．この状態はバイオマス密度が降水量 p とともに単調に増加し均一に分布した植生を表す．比較的低い降水量の $p_c < p < p_1$ でのみ安定し，高降水 $p > p_2$ では安定性は回復しバイオマス密度は高く植物が覆う状態となる．中間降水量の範囲 $p_1 < p < p_2$ では，均一な植生は有限波数の摂動に対して不安定であり (Murray et al, 1989) (Hohenberg et al, 1993), さまざまな形態の植生パッチパターンに変移する (Hardenberg et al, 2001)． Fig7 から半湿潤地域 (dry-subhumid) のモデルはバイオマス密度が高く植物が覆う状態である，半乾燥地域 (semi-arid) から乾燥地 (arid) に移るとパッチパターンのモデルは縞模様から斑模様へと変移する．最終的に資源（水分）の不足が閾値に達すると，パ

ッチは崩壊し植生のない均質な状態に移行することがこの図で示されている (Hardenberg et al, 2001).

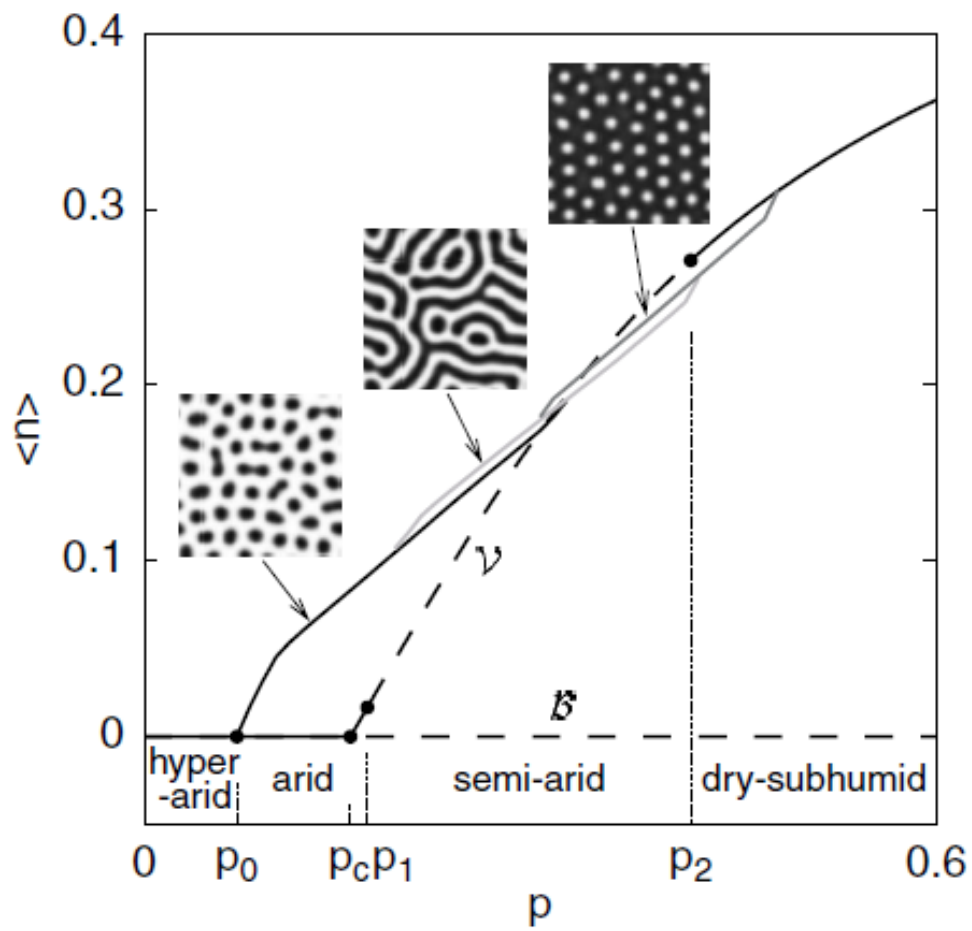


Fig. 7 Turing Patchiness Pattern (Hardenberg et al, 2001) .

2.3.1.4 パッチパターンと壊滅的生態系のレジームシフト

半乾燥地・乾燥地の植物の斑模様の形成には多年生植物の灌木類の分布パターンが強く関係している (Rietkerk et al, 2004). 自然界に於いてこの植生パッチは水資源をめぐる競争によって形成されている (Hardenberg et al, 2001). これらの灌木類は、降水量が少ない過酷な土地に於いて自己組織化した植生パッチを形成し生育する (Rietkerk et al, 2004). 降水量に依存する一年生植物の草本類は脆弱な降水量では生育できず、多年生植物の草本類も灌木類の植生パッチとの水資源獲得競争となるため地表を覆うほど分布することはできない. 湿潤な地域では降水量の制限が少ないため灌木類のパッチ同士の間を覆うように草本類が生育できる. モンゴルの半乾燥地・乾燥地に於いて多年生植物の灌木類がパッチ状に生育することで生態系ネットワークを形成し安定している. しかし、ここに何らかの影響 (Impact) が加わると生態系ネットワークは崩壊する. Fig.8 ではその崩壊の過程を表している. 自然状態では過酷な土地に変移すると自己組織化した植生パッチが斑状に形成され安定状態を維持するが、縞模様の状態よりは不安定な状態であるとも言える. これは本来緩やかな速度で景観が変移するが、ここに予期せぬ突然の変化、壊滅的生態系シフト (Catastrophic shift) が発生すると、急激に植生パッチは壊滅する. このシフトが発生すると均質な状態に陥り、その履歴効果により元の状態への回復は困難となる (Rietkerk et al, 2004). 植

物が覆う状態で分布する湿潤地域は資源が豊富なため回復力は高いが、パッチ状に点在する過酷な土地では脆弱である (Fig.9). そのためこれらの植生のパッチパターンを定量的に評価することは壊滅的生態系シフトを防ぐ上で重要となる.

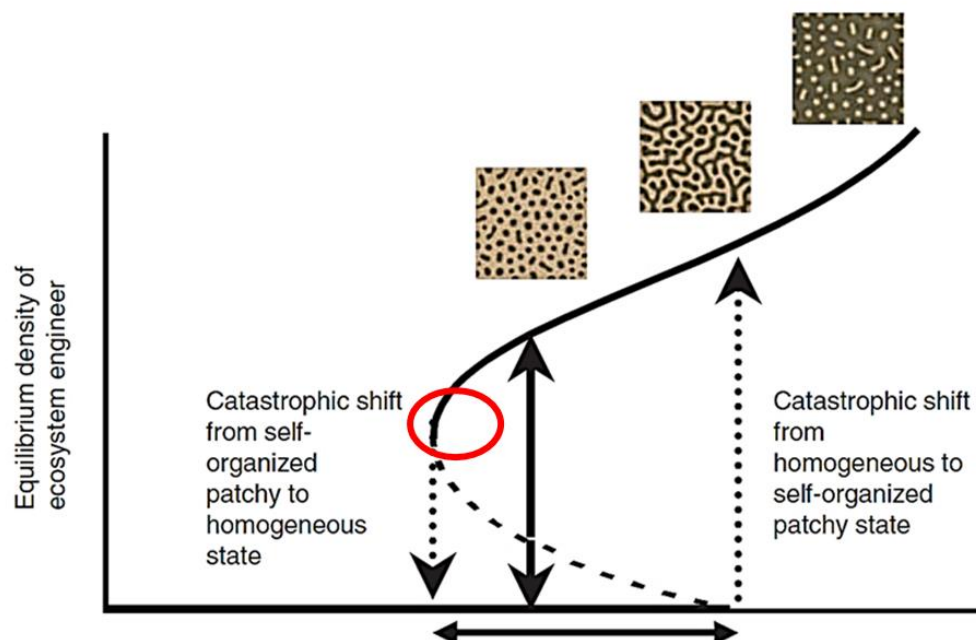


Fig. 8 Model showing how ecosystems may undergo a predictable sequence of emerging self-organized patchiness as resource input decreases or increases (Rietkerk et al, 2004) .

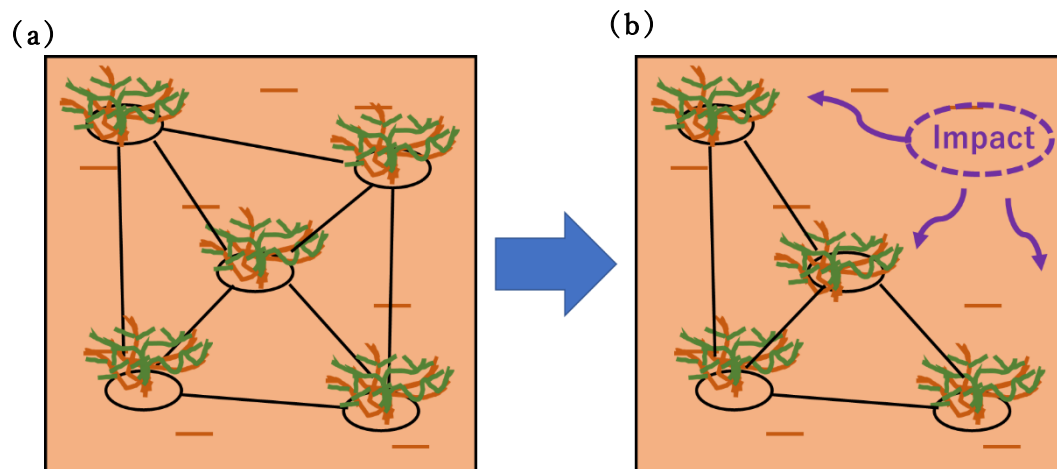


Fig. 9 Collapse of ecosystem networks in semi-arid areas.
(where, (a) is a state where the ecosystem network is stable,
and (b) is a state where the ecosystem network is unstable).

2.3.1.5 NDVI による植生パッチパターンのモデルリング

モンゴルの広域に於ける，半湿潤，半乾燥地域のパッチパターンを定量的に評価するため，光学センサ Sentinel-2 の衛星画像（Fig.10）から NDVI を算出しパッチパターンのモデルリングを行い，経度，緯度沿いの規則性，共通点などに注目し比較を行った．モデルリングにはレアックス社製の Sufer-18 を使用した．

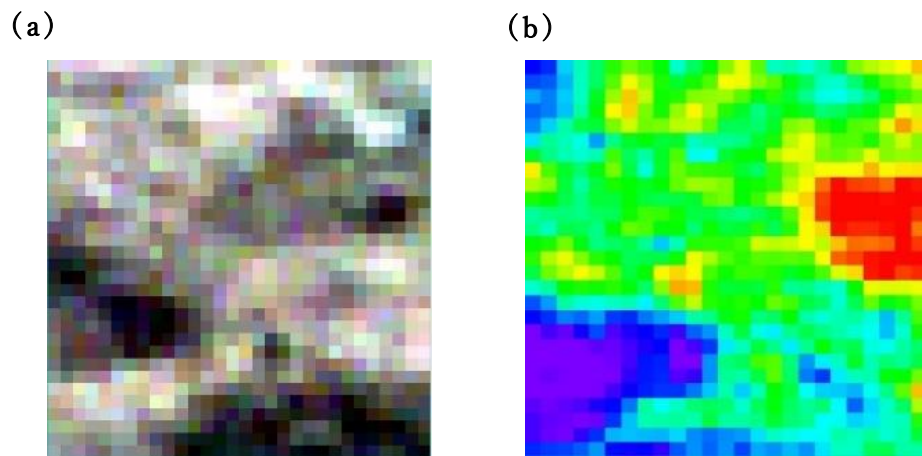


Fig.10 Satellite image (250 m² scale) acquired from the optical sensor Sentinel-2. (Where, (a) is a R-G-B color combination image, (b) is an NDVI image).

2.3.2 マイクロ派衛星を用いた解析手法

本研究ではモンゴルの半湿潤，半乾燥地に於ける地表面状態の定量的評価を行うため，マイクロ波衛星の Sentinel-1 の合成開口レーダー (SAR: Synthetic Aperture Radar) を用いた (以降「SAR」と称する). Sentinel-1 は欧州連合 (EU) とヨーロッパ宇宙機関 (ESA) の地球観測プログラム「コペルニクス計画」によって開発されている地球観測衛星である. 入射角は 29.1° ～ 46.0° である. Sentinel-1A 及び Sentinel-1B の 2 基からなる衛星コンステレーション (特定の方式に基づく多数個の人工衛星の一群・システム, Satellite constellation) によりミッションを行う. Sentinel-1 は搭載した C バンド (波長 5.6cm) 合成開口レーダー (C-band SAR instrument) の観測によって地表と海洋の情報を 24 時間体制で供給している (<https://www.restec.or.jp/satellite/sentinel-1-a-1-b.html>).

Table 2 Specifications of the Sentinel-1 satellites

モード	観測幅	解像度	偏波
Stripmap	80km	5m × 5m	HH-HV, VV-VH
IWS (Interferometric Wide Swath)	250km	5m × 20m	
EWS (Extra Wide Swath)	400km	25m × 100m	
Wave	20km × 20km	5m × 20m	HH or VV

2.3.2.1 Sentinel-1 の SAR

SAR はセンサからマイクロ波を発射し，地表で跳ね返ってきたマイクロ波をとらえるセンサである． SAR センサは対象物の有無，変化，材質や土壌水分を見ることができる． マイクロ波電波は雲を通過するため光学センサとは異なり天候に左右されず観測することができる． 光学センサの Sentinel-2 で取得する衛星画像とは異なり， SAR が搭載されている Sentinel-1 で取得した衛星画像は白黒画像として表示される (Fig.11)． ざらざらした地表面ほど多く電波が返るため明るく表示され， 水面や滑らかな地表面では電波が反射してしまうことにより暗く表示される（鏡面反射）．

(a)



(b)

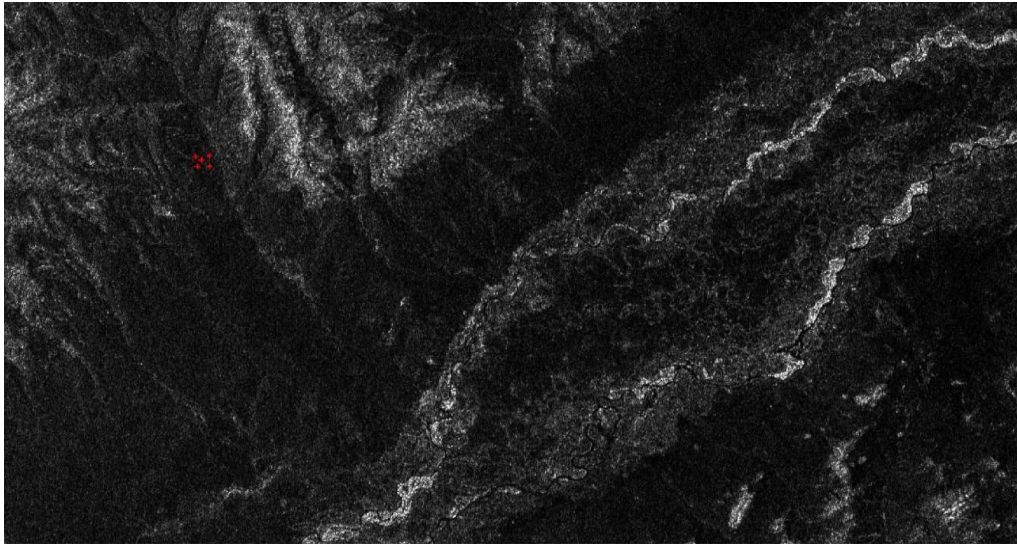


Fig. 11 Differences between the optical sensor Sentinel-2 and the microwave satellite Sentinel-1. (where, (a) is an image obtained from Sentinel-2, and (b) is an image obtained from Sentinel-1).

2.3.2.2 後方散乱係数

衛星から発せられたマイクロ波は地物（植物，建物など）に到達すると様々な方向に散乱することにより，来た方向へ反射する電波が存在する．この反射を後方散乱（backscatter, backscattering）と呼ぶ．またこの後方散乱の値を後方散乱係数（backscattering coefficient）と呼ぶ．マイクロ波に干渉し後方散乱を引き起こす要因として地表面状態と土壌水分が関係する．後方散乱係数は地表面が凸凹の状態であるほど高くなる．この地表面の凸凹の度合いを粗度（roughness）と呼ぶ．地表面が滑らかでマイクロ波に干渉する要因となる岩や植物がない状態では後方散乱は発生せず後方散乱係数は低く，衛星画像では暗く表示される．またマイクロ波は地面を通過するため後方散乱は発生しにくい．一方，粗度が高い凸凹した土地，植物や建物などマイクロ波に干渉する要因が存在する場合，後方散乱が発生し後方散乱係数は高くなる（Fig.12）．本研究で使用する Sentinel-1 の C バンド SAR は植物の枝に反射しやすい特性を持つ．そのため植生の有無による後方散乱係数の測定を知る用途では適している．しかし地表面にマイクロ波に干渉する要因が無い場合でも，土壌水分により後方散乱が発生する場合もある．これはマイクロ波の電波が地面を通過する際，土壌水分により誘電率が高まることで土壌内に於いて後方散乱が発生するためである．その場合衛星画像では明るく表示される．水面ができてしまうと鏡面反射を引き起こすため後方散乱は発生しない（Fig.13）．

後方散乱に影響を与えるその他の要因として衛星による観測状態が起因することがある．一つは衛星からの入射角の違いである．入射角 (incidence angle) は地表散乱面に入射するビームと地表と直角の法線のなす角度である．もう一つは使用する波長の違いにより観測される対象が変わる．しかし本研究で用いた Sentinel-1 の入射角、波長帯 (C バンド (4~8GHz)) 共に観測段階で固定されているため今回の研究には特に影響はないと考える．また衛星の軌道の違いも影響する．Sentinel-1 には上昇軌道 (Ascending) と下降軌道 (Descending) の二種類が存在する．上昇軌道は西側から北上し観測する軌道であり、この場合建物や森林などの高所物が存在すると、東側が影となり観測されない．下降軌道は東側から南行し観測する軌道であり、西側が影となり観測されない場合もある (Bouvet et al, 2018)．しかし本研究で取得したモンゴル国の衛星画像の軌道は全て下降軌道であることに加え、調査対象地の地形は平坦であり影を生む高所物や山などは無いことから同じく影響は無いと考える．

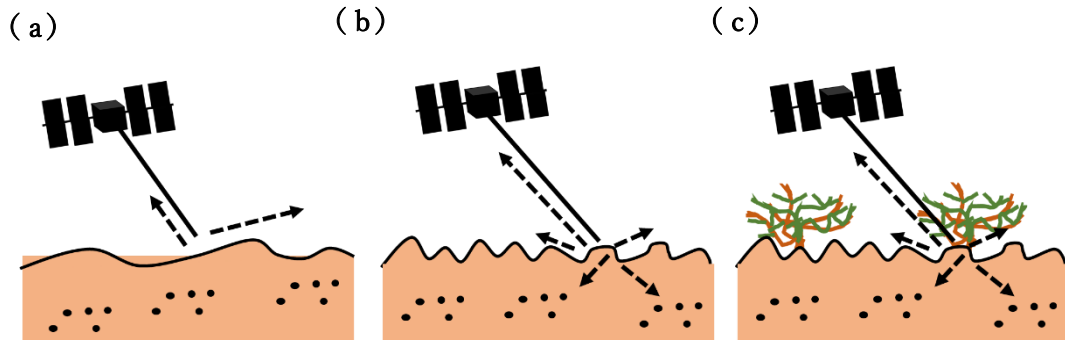


Fig. 12 Occurrence of microwave and backscatter on dry ground surfaces. Where, in (a), the ground surface is smooth and backscattering is unlikely to occur; in (b), the ground surface roughness interferes with microwaves and backscattering occurs; and in (c), the plant interferes with the microwave and causes backscattering.

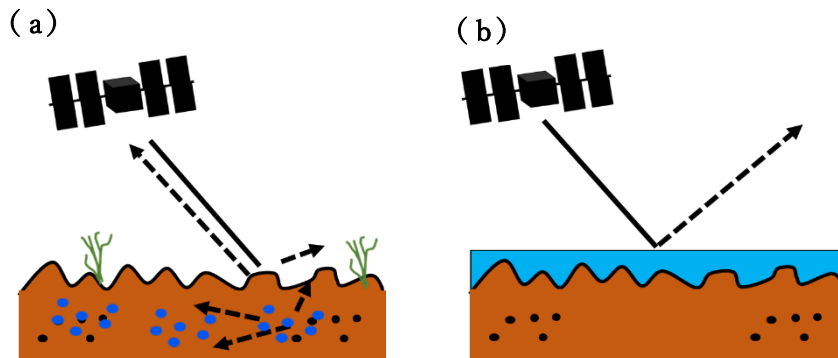


Fig. 13 Occurrence of microwave and backscatter on moist ground surfaces. Where, in (a), water in the soil interferes with microwaves, causing backscattering; and in (b) is since radio waves are specularly reflected on the water surface, backscattering does not occur.

2.3.2.3 Sentinel-1 の衛星画像の解析手法

Sentinel-1 の衛星画像は現地調査と同じく 2019 年 4 月の春季と 2019 年の夏季の画像を取得した．取得した衛星画像は，現地調査サイト (250 m²) と同じ地点を抽出した．方法は Sentinel-2 と同様，ENVI を使用した．それらの結果から，半湿潤，半乾燥地域に於いて後方散乱係数に影響を与える要因である粗度 (roughness)，植生状態の季節性，土壌水分のどの特性がマイクロ波に干渉するのかを解明する．

第 3 章 結果と考察

3.1 現地調査の結果

3.1.1 植生のバイオマス (Volume of biomass) の特性

2019 年夏季に於けるフィールドで計測された植物の被度と草丈のデータを用いて植物量 (バイオマス) を推定した. Fig. 14 は植物を種ごとに分類せず, 単純なサイトごとのバイオマス量を示す. 結果として最も降水量が多く湿潤な地域 Site9 (ホスタイ国立公園) ではバイオマス量は最も多く, 同じく湿潤な草原の調査サイトの Site4, 3 も半乾燥地域より高い. バイオマス量が最も低いサイトは降水量が少なく乾燥地域の Site6 (ツォグトオボー) である. なお, グラフの横軸は調査地の降水量に基づいて作成している.

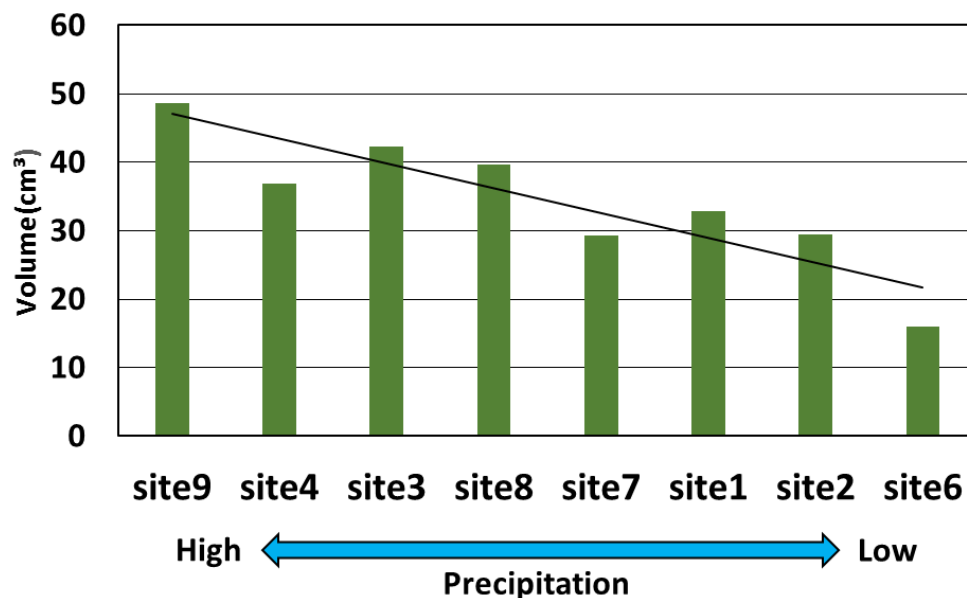


Fig. 14 Plant changes of site9-site6 in summer season (2019).

3.1.2 各植物種のバイオマスの特性

Fig.15 は植物を一年生植物 (an annual plants), 二年生植物 (biennial plants), 多年生植物 (Perennial plants), 灌木類 (shrubs) に分類してそれぞれのバイオマス量を調べた。最も降水量が高い Site9 では多年生植物の草本類のバイオマス量が多い。首都圏の幹線道路沿い近くの過放牧地域であると思われる Site4 は灌木類が草本類より多い特徴を示した。これは最近数年の家畜による過放牧の影響によって草本類の減少や矮小化により残存しやすい嗜好性のない灌木類が多く残ったためであると考えられる。半乾燥地域の Site8, 7, 2 では多年生植物の草本類のネギ属 (*Allium mongolicum*) (Fig.16) や灌木類 (*Caragana leucophylla*) などが多く分布していた (Fig.17)。また一年生植物のバイオマス量が特に多い Site3, 1 は先駆種 (土地が何らかの要因で更新された際、初期段階に侵入する種、パイオニア種とも呼ぶ) と思われる一年生植物の *Neopallasia pectinata* が優先していた影響によると考えられる (Fig.18)。なお、バイオマス量は植物の被度と草丈のデータを用いて求められているため、バイオマス量が少ないからといってその種の分布も少ないというわけではない。特に一年生植物の草本類の被度は高くとも、草丈が平均 1 ~ 5 cm と低いいためバイオマス量も少なくなったと考えられる。極端にバイオマス量が多い *Neopallasia pectinata* は草丈が平均 20cm 程であるためその分高くなったと考えられる。

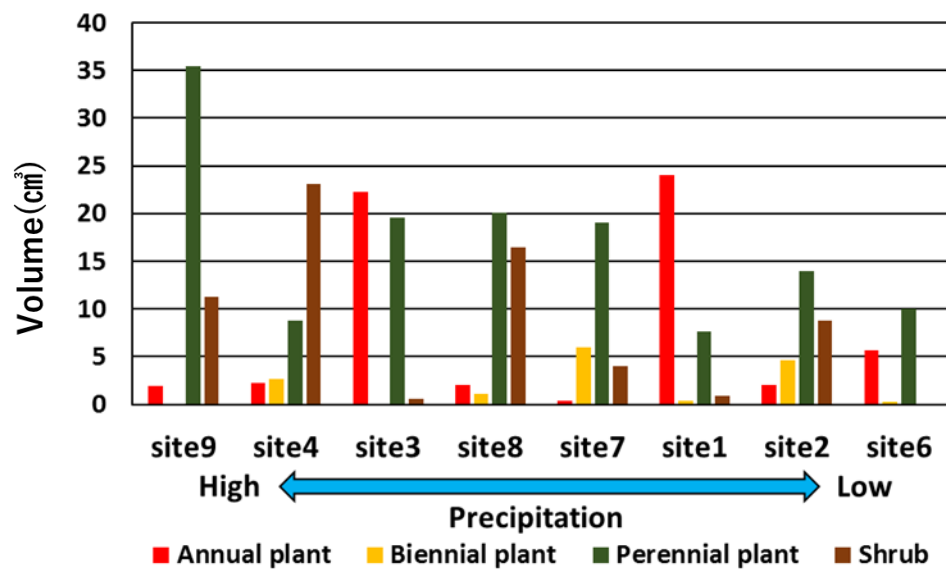


Fig. 15 Changes of annual plants, biennial plants, perennial plants and shrubs in summer season (2019).



Fig. 16 Photographic of *Allium mongolicum* in field.



Fig. 17 Photographic of *Caragana leucophylla* in field.



Fig. 18 Photographic of *Neopallasia pectinata* in field.

Table 3 List of plant species identified in field surveys

種目	学名	種類	属(和名)	科
1	<i>Artemisia palustre</i>	annual plant	ヨモギ属	キク科
2	<i>Bassia dasiphylla</i>	annual plant	ハウキギ属	ヒユ科
3	<i>Chenopodium acuminatum</i>	annual plant	アカザ属	ヒユ科
4	<i>Chenopodium sp</i>	annual plant	アカザ属	ヒユ科
5	<i>Corispermum mongolicum</i>	annual plant	コリスperl属	ヒガンバナ科
6	<i>Dontostemon integrifolius</i>	annual plant	ドントステモン属	アブラナ科
7	<i>Echinops gmelinii</i>	annual plant	ヒゴタイ属	キク科
8	<i>Eragrostis minor</i>	annual plant	スズメガヤ属	イネ科
9	<i>Salsola collina</i>	annual plant	オカヒジキ属	ヒユ科
10	<i>Artemisia macrocephala</i>	biennial plant	ヨモギ属	キク科
11	<i>Artemisia scoparia</i>	biennial plant	ヨモギ属	キク科
12	<i>Dracopcephalum foetidum</i>	biennial plant	ムシャリンドウ属	シソ科
13	<i>Hesperis flava</i>	biennial plant	ハナダイコン属	アブラナ科
14	<i>Lagochilus ilicifolius</i>	biennial plant	ラゴチルス属	シソ科
15	<i>Neopallasia pectinata</i>	biennial plant	ネオパラシア属	キク科
16	<i>Achnaterum splendens</i>	perennial plant		イネ目
17	<i>Allium mongolicum</i>	perennial plant	ネギ属	ヒガンバナ科
18	<i>Allium polyrhizum</i>	perennial plant	ネギ属	ヒガンバナ科
19	<i>Aster alpinus</i>	perennial plant	シオン属	キク科
20	<i>Astragalus junatovii</i>	perennial plant	ゲンゲ属	マメ科
21	<i>Astragalus laguroides</i>	perennial plant	ゲンゲ属	マメ科
22	<i>Astragalus miniatus</i>	perennial plant	ゲンゲ属	マメ科
23	<i>Astragalus monophyllus</i>	perennial plant	ゲンゲ属	マメ科
24	<i>Bupleurum bicaule</i>	perennial plant	ミシマサイコ属	セリ科
25	<i>Carex duriuscula</i>	perennial plant	スゲ属	カヤツリグサ科
26	<i>Cleistogenes songorica</i>	perennial plant	クレイストゼエネス属	イネ科
27	<i>Cleistogenes squarosa</i>	perennial plant	クレイストゼエネス属	イネ科
28	<i>Convolvulus ammanii</i>	perennial plant	セイヨウヒルガオ属	ヒルガオ科
29	<i>Dontostemon elegans</i>	perennial plant	ドントステモン属	アブラナ科
30	<i>Goniolimon speciosum</i>	perennial plant	ゴニオリモン属	イソマツ科
31	<i>Heteropappus hispidus</i>	perennial plant	ヤマジノギク属	キク科
32	<i>Iris tenuifolia</i>	perennial plant	アイリス属	アヤメ科
33	<i>Leymus sp</i>	perennial plant	ハマニンニク属	イネ科
34	<i>Oxytropis aciphylla</i>	perennial plant	オヤマノエンドウ属	マメ科
35	<i>Oxytropis laguroides</i>	perennial plant	オヤマノエンドウ属	マメ科

種目	学名	種類	属(和名)	科
36	<i>Oxytropis traganthoides</i>	perennial plant	オヤマノエンドウ属	マメ科
37	<i>Panzerina lanata</i>	perennial plant	パンゼリーナ属	シソ科
38	<i>Potentilla bicaule</i>	perennial plant	キジムシロ属	バラ科
39	<i>Potentilla bifurca</i>	perennial plant	キジムシロ属	バラ科
40	<i>Potentilla multifida</i>	perennial plant	キジムシロ属	バラ科
41	<i>Ptilotrichum canescens</i>	perennial plant	スギゴケ属	スギゴケ科
42	<i>Rheum nanum</i>	perennial plant	ショウヨウダイオウ	タデ科
43	<i>Saussurea</i> sp	perennial plant	トウヒレン属	キク科
44	<i>Scorzenora divaricata</i>	perennial plant	フタナミソウ属	キク科
45	<i>Scorzenora</i> sp	perennial plant	フタナミソウ属	キク科
46	<i>Sibbaldia adpressa</i>	perennial plant	シバルディアプロカンベンス	バラ科
47	<i>Stipa glareosa</i>	perennial plant	スティパ属	イネ科
48	<i>Stipa krylovii</i>	perennial plant	スティパ属	イネ科
49	<i>Zygophyllum potaninii</i>	perennial plant		ハマビシ科
50	<i>Zygophyllum rosovii</i>	perennial plant		ハマビシ科
51	<i>Ajania achilleoides</i>	shrub	アジャニア属	キク科
52	<i>Ajania fruticosa</i>	shrub	アジャニア属	キク科
53	<i>Artemisia adamsii</i>	shrub	ヨモギ属	キク科
54	<i>Artemisia frigida</i>	shrub	ヨモギ属	キク科
55	<i>Artemisia santolinifolia</i>	shrub	ヨモギ属	キク科
56	<i>Artemisia xerophytica</i>	shrub	ヨモギ属	キク科
57	<i>Asparagus gobicus</i>	shrub	アスパラガス属	ユリ科
58	<i>Brachanthemum gobicum</i>	shrub		キク科
59	<i>Caragana leucophylla</i>	shrub	ムレスズメ属	マメ科
60	<i>Caragana macrocephala</i>	shrub	ムレスズメ属	マメ科
61	<i>Caragana microphylla</i>	shrub	ムレスズメ属	マメ科
62	<i>Ephedra monosperma</i>	shrub	マオウ属	マオウ科
63	<i>Haplophyllum dauricum</i>	shrub		ミカン科
64	<i>Krascheninnikovia ceratoides</i>	shrub		ヒユ科
65	<i>Potania mongolica</i>	shrub	アヤメ属	アヤメ科
66	<i>Ptilotrichum tenuifolium</i>	shrub	スギゴケ属	スギゴケ科
67	<i>Zygophyllum xanthoxylon</i>	shrub		ハマビシ科

3.1.3 各サイトに於ける NDVI

Fig.19 は 2019 年の春季と同年の夏季に於ける葉スケールの NDVI である．全体的に半湿潤地域から半乾燥地域に推移するほど NDVI は低くなる．半乾燥地域の Site7 や乾燥地（砂漠）の Site6,2 は春季の NDVI が夏季より高い．ゴビ砂漠の植生は 5 月から NDVI が高くなる事例が先行研究でも確認され，これは植物が 5 月に入り展葉することで植生状態が回復している影響であると考えられる（Demura , 2015）．ゴビ砂漠は春季の降水量は草原より少ないが，気温が高いため草原より展葉が早まると考えられる（Fig.20）．そのため現地調査を行った 8 月はすでに疲弊した状態であり光合成も活性ではなかったと考えられる．

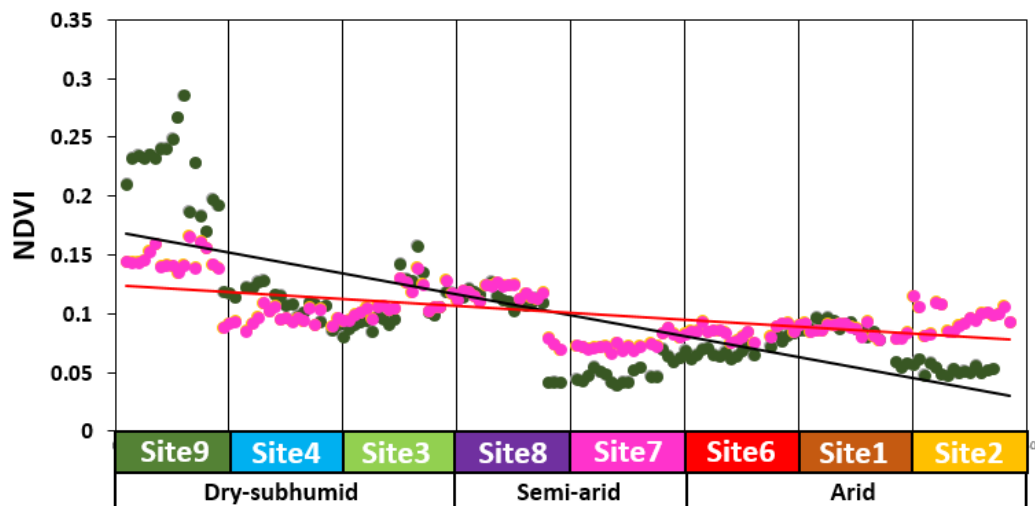


Fig. 19 The leaf scale NDVI calculated from ASD FieldSpec® in field surveys in site9-site6 on the summer and spring season (2019).

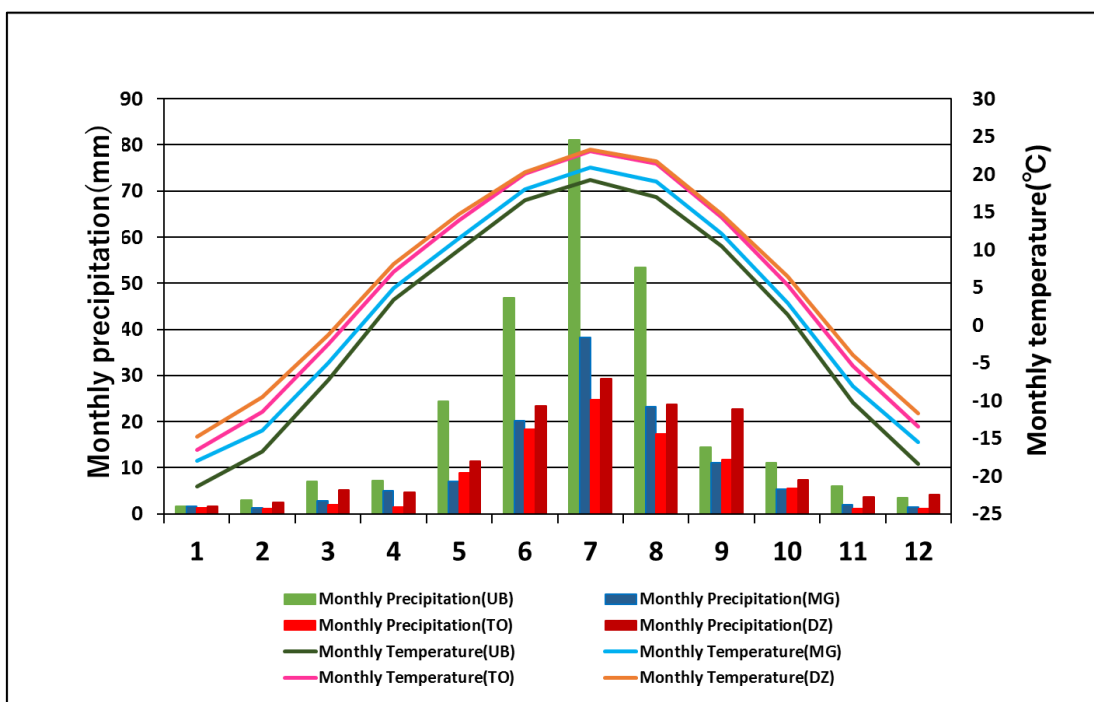


Fig. 20 The changes of monthly precipitation and monthly temperature for site9-sitel during 2007-2016.

3.2 光学センサ，植生パッチパターン

3.2.1 一年生植物，多年生植物の NDVI の違い

Fig. 21 は 2017 年の夏季に於ける現地植生調査の葉スケールの NDVI である．グラフは一年生植物と多年生植物（草本類，灌木類）に分けて表示している．ウランバートル近郊の半湿潤地域の草原の Site4 と 3 では，一年生植物の NDVI が 0.3，0.4 と高い．半乾燥地域の砂漠の Site1 と 2 では一年生植物より多年生植物の NDVI が高い．草原では降水量が多くそのため一年生植物の草本類が多く生育する．しかし砂漠では降水量が少ないため多年生植物が草本類より多く生育する．降水量に依存する一年生植物の草本類は生育しにくい上に，多年生植物との資源獲得競争に対抗できないため NDVI は低いと考えられる．

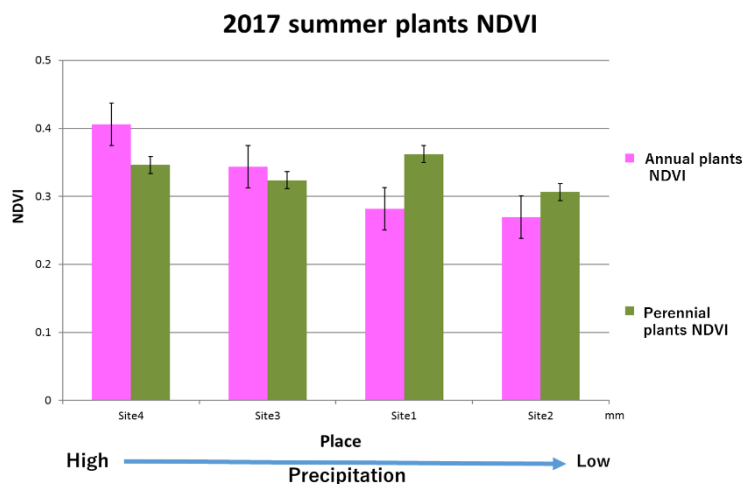


Fig. 21 Differences between annual plants and perennial plants of NDVIs at each site in summer season (2017).

3.2.2 NDVI のパッチパターンモデル

Fig. 22は光学センサSentinel-2から算出したNDVIの値を基に作成された植生パッチパターンのモデル図である．このモデルはNDVIの値を区画化することでパッチを表す．ウランバートル近郊の半湿潤地域の草原（ハンガイ・ヘールタル）で多く生育する一年生草本類の植物のNDVIは0.1～0.5と高く，大地を覆う状態の分布をしているため斑状のパッチパターンは形成されず，縞模様のパターンが見られる結果となった．草原でも灌木類が生育している地域もあるが，NDVIが高い一年生植物の草本類が灌木類の間を埋めるように被覆しているためNDVIの模様は広く縞模様となる．一方，半乾燥地域のゴビでは，降水量に依存しない多年生植物の灌木類が多く生育する．NDVIは0.1以下と低いが斑状に点在している影響により，細かな模様のパッチパターンがみられた．このパッチの対象スケールは灌木類一個体ではなく，灌木類群落の空間パターンを対象とする，ここでは一年生植物や多年生植物の草本類は大地を覆うように生育していない．よって灌木類群落のパッチ同士の間は土壌が露出した状態であるためその部分のNDVIは低くなり，パッチに沿って区画されることで斑模様となるFig. 23．注意点として本研究ではこれらのパッチのスケールについての定量的評価を対象としていないため，推測の域であることを留意する．以上の結果からモンゴルの草原植生の空間パターンは半湿潤，半乾燥地の二つの特徴がある．

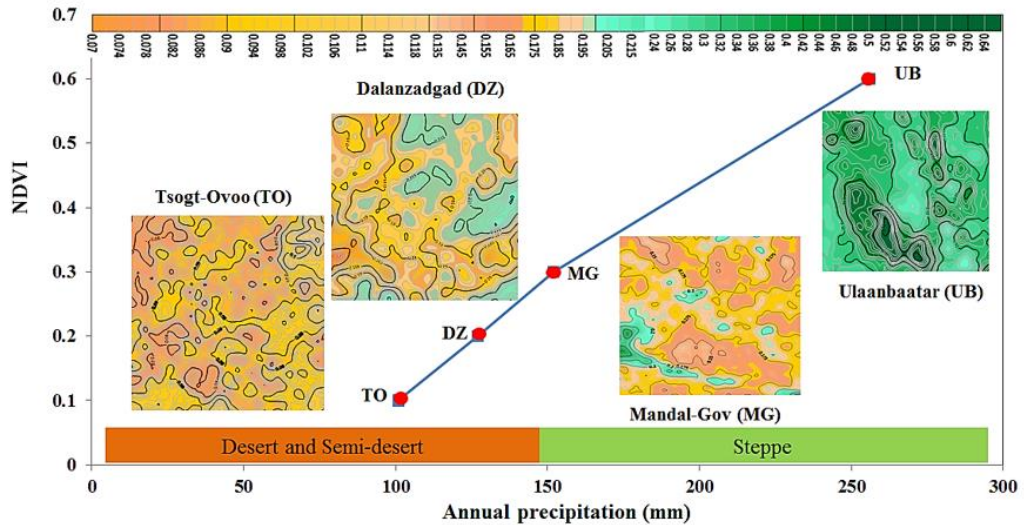


Fig. 22 Simulation results of dimensionless biomass (NDVI) along a gradient of decreasing water stress (precipitation) for (UB) - Ulaanbaatar; (MG)-Mandal-Gov; (DZ)-Dalanzadgad; and (TO)-Tsogt-Ovoo based on simplified equation (1) and (2). To refine the representation of biomass transport, the diffusion term in the P equation is replaced by a convolution of a dispersion kernel and standing biomass, defining the seed rain about a parent plant.

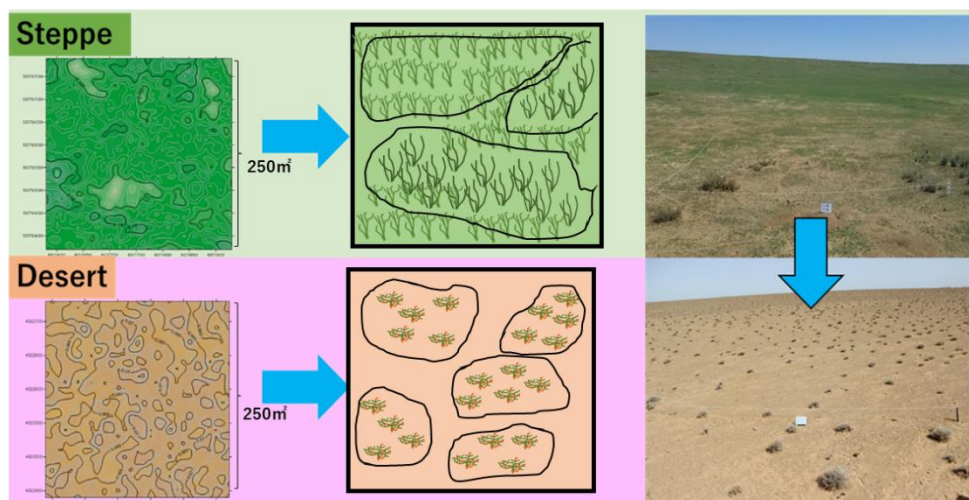


Fig. 23 Differences in the generated of NDVI patchiness in steppe and deserts area.

3.3 マイクロ波合成開口レーダー

3.3.1 後方散乱係数，NDVI を用いた解析

マイクロ波に干渉する要因として，地表面粗度，植生の季節性，土壌水分の多少が挙げられる．本研究では植生の季節性との関係を明らかにするため Sentinel-2 で求めた NDVI を後方散乱係数との関係を調べる指標として用いた．Table.4 は簡易的に観測した後方散乱係数の値を参考までに示す．

Table 4 Backscattering coefficient of each region in Mongolia and Japan.

モンゴル国		日本国	
観測場所	後方散乱係数	観測場所	後方散乱係数
森林	0.02～0.1	森林	0.02～0.1
草原	0.002～0.02	牧草地	0.01～0.02
ゴビ	0.002～0.025	砂浜	0.01～0.05
都市	0.02～0.2	都市	0.1～0.9

3.3.1.1 各サイトに於ける，両季節の後方散乱係数

Fig. 24 は各サイトの 2019 年春季と同年の夏季に於ける後方散乱係数を Sentinel-1 の衛星画像から求めたグラフである．結果として半湿潤地域のサイトでは，夏季の後方散乱係数が春季より高く，季節による違い（季節性）が見られる．半湿潤地域のサイトは両季節とも大きな違いはなく，季節性が見られない．乾燥地の Site2 は春季の後方散乱係数が夏季より高い結果となった．

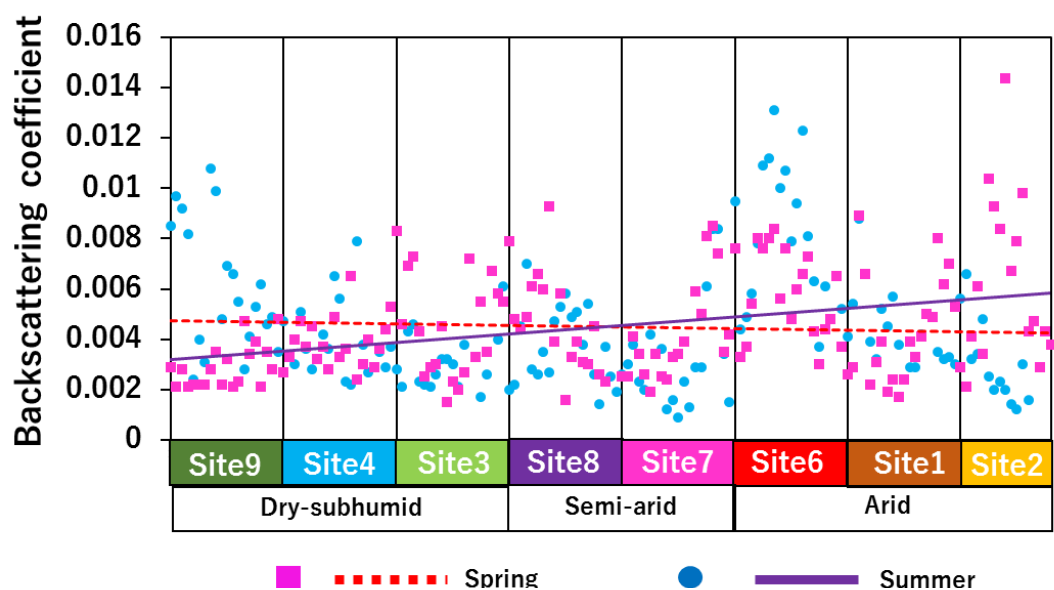
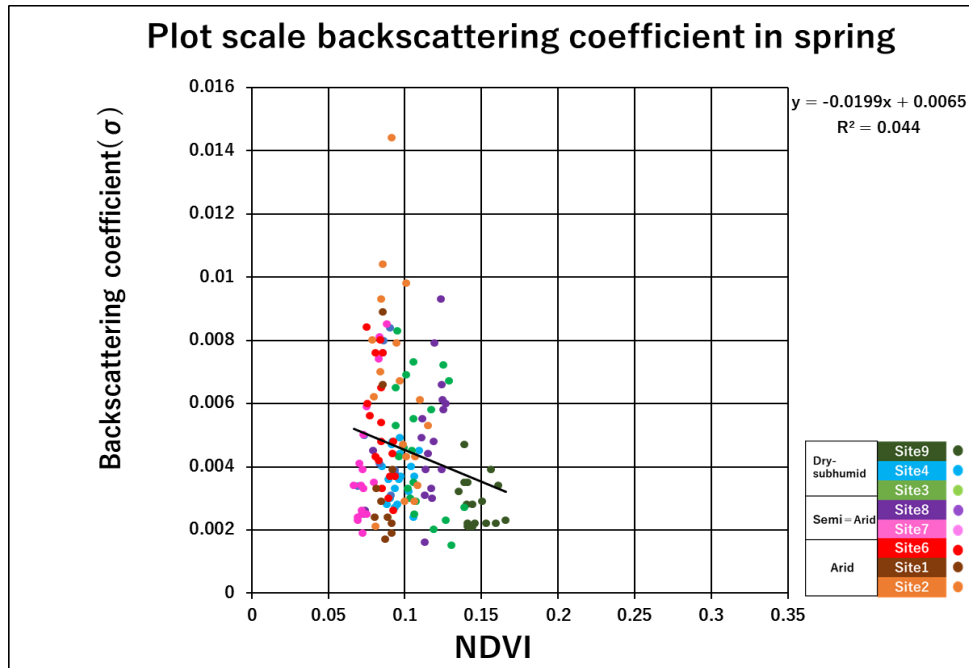


Fig. 24 Backscattering coefficient changes of site9-site6 in summer and spring season (2019).

3.2.1.2 後方散乱係数と NDVI の関係（プロットスケール）

Fig. 25 は現地調査のプロット（10 m²）と同地点のピクセルで抽出した NDVI と後方散乱係数との相関グラフである． 夏季に NDVI が高くなっているサイトでは後方散乱係数も増加している（Site9）． NDVI が春季，夏季とも大きく変化していない Site8 では後方散乱係数にも大きな違いは見られない． 砂漠のサイトでは両季節とも変化しないが， NDVI は春季に低くなるため逆相関となる． なおプロットスケールで抽出した場合サンプル数が少なくなるため過大評価となることを留意しなければならない． それとは異なりサイト全体（250 m²）で抽出したデータは， プロットで抽出した場合と比べより広範囲の地表面を定量的に評価できる（Fig. 26）．

(a)



(b)

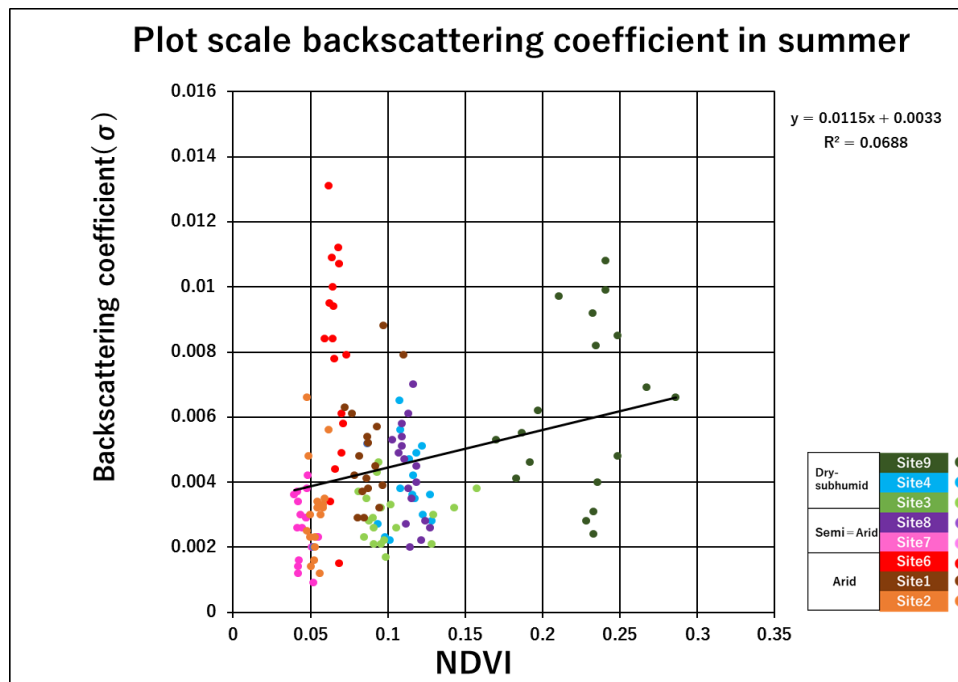
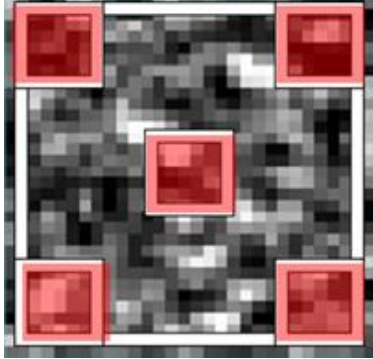


Fig. 25 Linear correlation graph of backscatter coefficient and NDVI (Where, (a) on spring season (2019) ; and (b) on summer season (2019)).

(a)



(b)

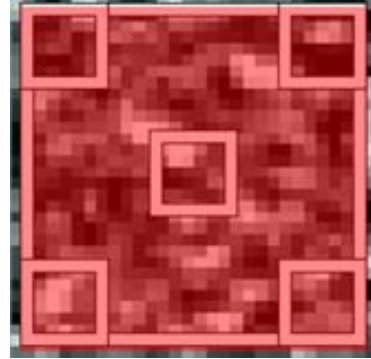
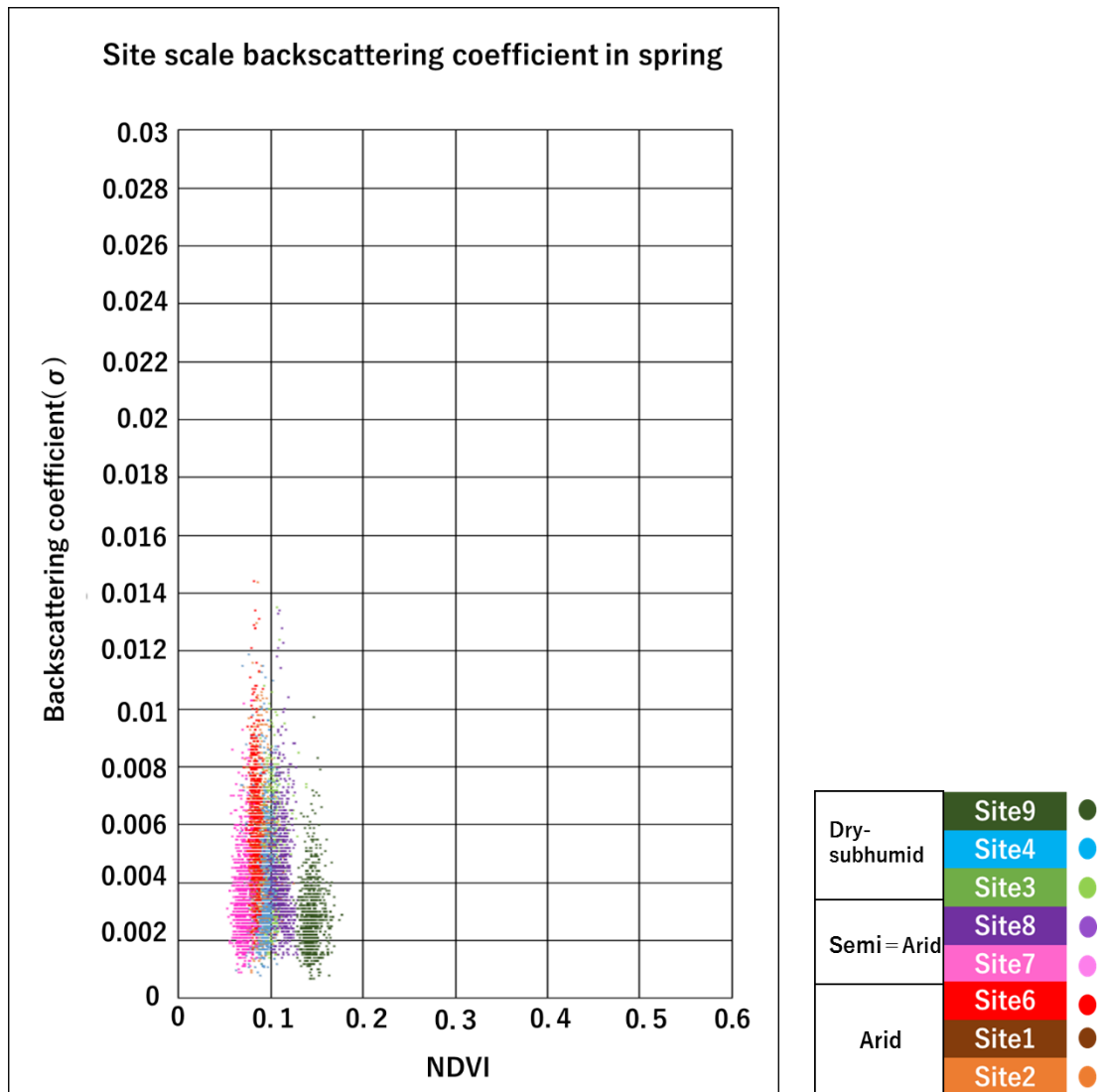


Fig. 26 The extraction method of the backscattering coefficient at plots and fields sites scale (Where, (a) is when extracted on the plot(10 m^2) $\times 5$ scale, and (b) is when extracted on the site(250 m^2) scale).

3.3.1.3 後方散乱係数と NDVI の関係（サイトスケール）

Fig.27 はサイト全体（250 m²）で抽出した NDVI と後方散乱係数との相関図である．プロットで抽出した場合と比べより広範囲の地表面を定量的に評価できる．全体的にプロットで抽出した Fig.25 と同様の傾向がみられる．Fig.25(プロットで抽出した場合)では Site3 は夏季が春季より低い傾向が見られたが Fig.27(サイトで抽出した場合)では大きな違いは見られなかった．

(a)



(b)

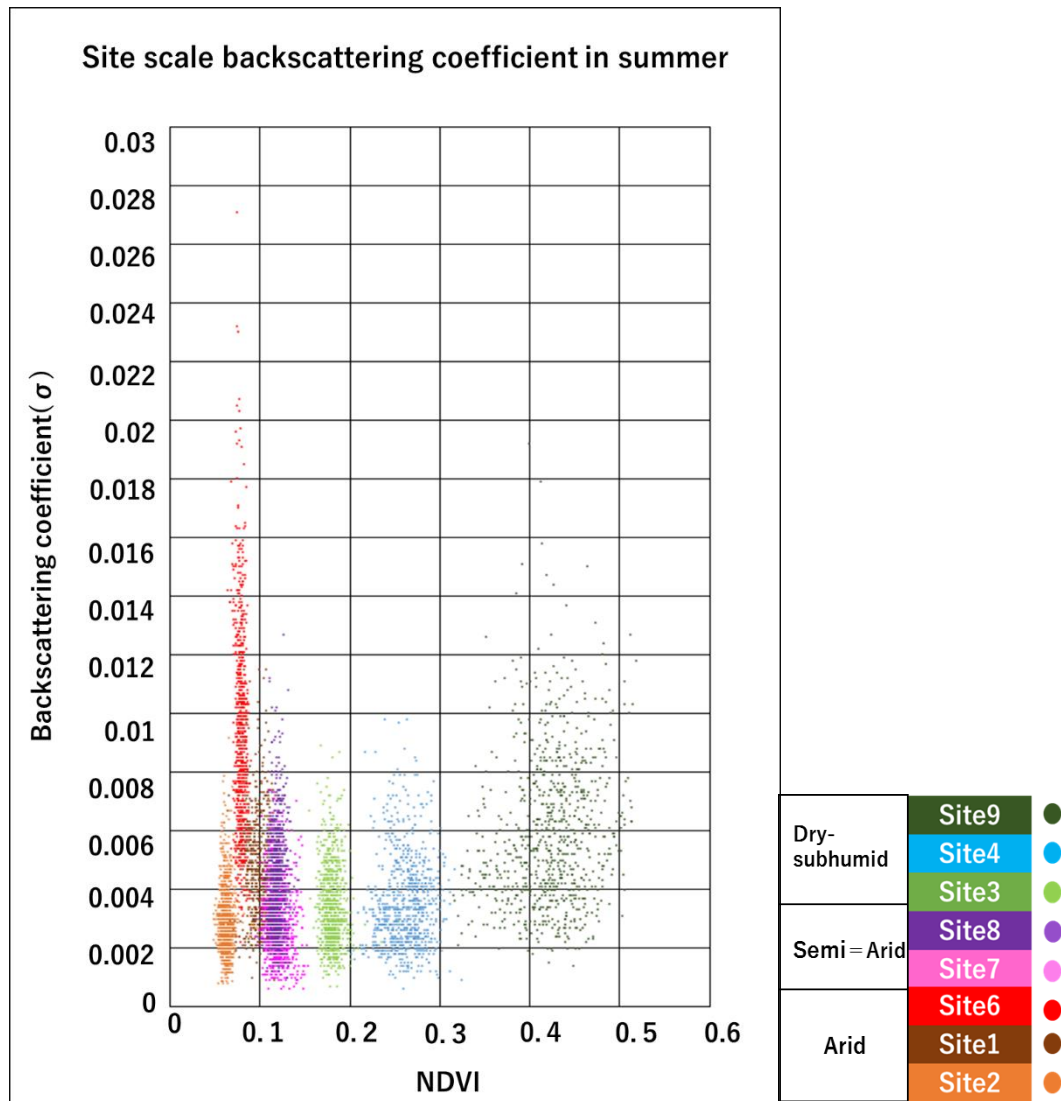


Fig. 27 Linear correlation graph (site scal) of backscatter coefficient and NDVI (Where, (a) on spring season (2019)and (b) on summer season (2019)).

3.3.2 後方散乱係数と土壌水分の関係

マイクロ波の電波は地面を通過する際、土壌水分により誘電率が高まることで土壌内に於いて後方散乱が発生する。Fig.28 は先行研究で示された粗度因子を用いた土壌水分量と後方散乱係数関係の決定法の説明図である (Nakaegawa et al, 1998)。これは土壌水分量の増加に伴い後方散乱係数は対数関数的増加をする傾向を示している。この関数グラフは(5)の式で求められる。本研究では現地の土壌水分量と衛星画像から求めた後方散乱係数の関係を探る。

$$\sigma_{pp}^0(\text{dB}) = 10 \log \sigma_{pp}^0 = 10 \log |\Gamma(M_v, \theta)| + 10 \log f(\sigma, l, \theta) \quad (5)$$

$\sigma_{pp}^0(\text{dB})$: pp マイクロ波偏波の後方散乱係数

M_v : 土壌水分量

θ : 入射角

$\Gamma(M_v, \theta)$: 土壌水の反射率

$f(\sigma, l, \theta)$: 地表面の粗度

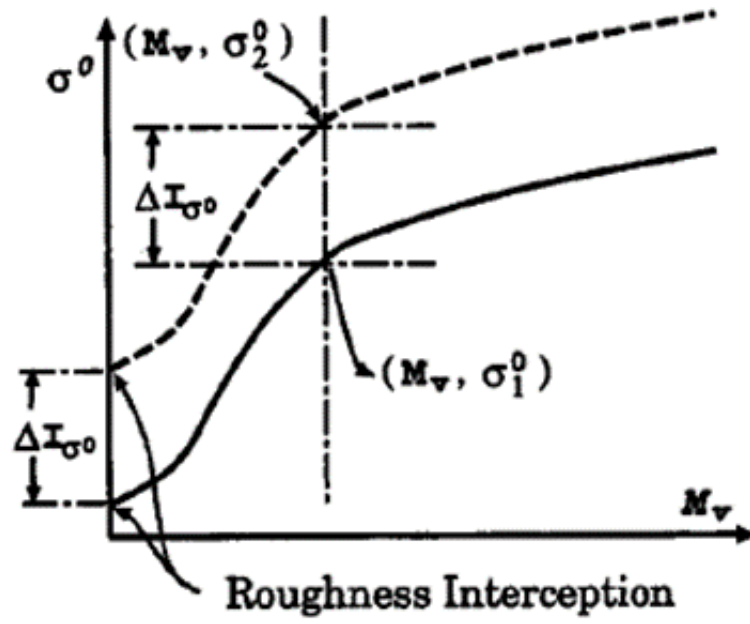


Fig. 28 Explanatory drawing of the method of determining soil moisture content and backscattering coefficient using roughness factor (Nakaegawa et al, 1998) .

3.3.2.1 土壌水分量現地測定

Fig. 29 は 2019 年の春季と夏季の現地調査で測定した土壌水分量である。なお、その日限りの結果であるため天候によって土壌水分量は変動することがある。全体的に降水量が多い夏季の土壌水分が高い。Site3 は湿地帯であるため他のサイトより高く、半湿潤地域は春季と夏季の差が大きい傾向がある。

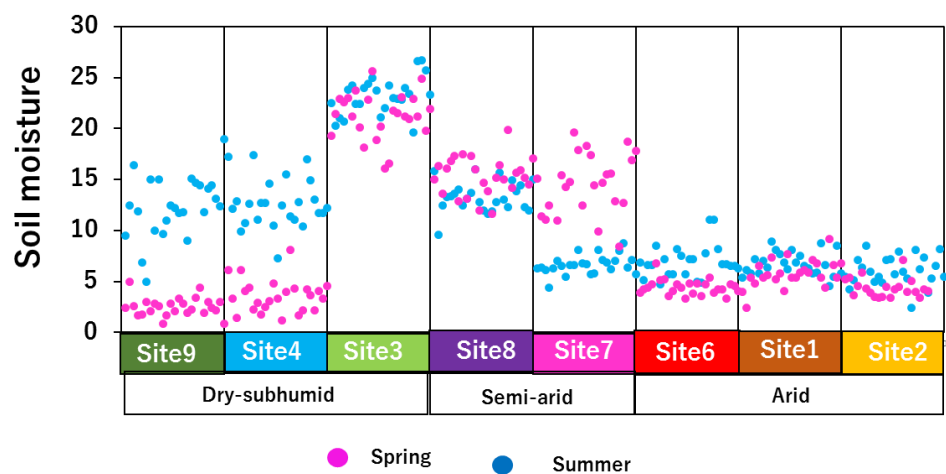
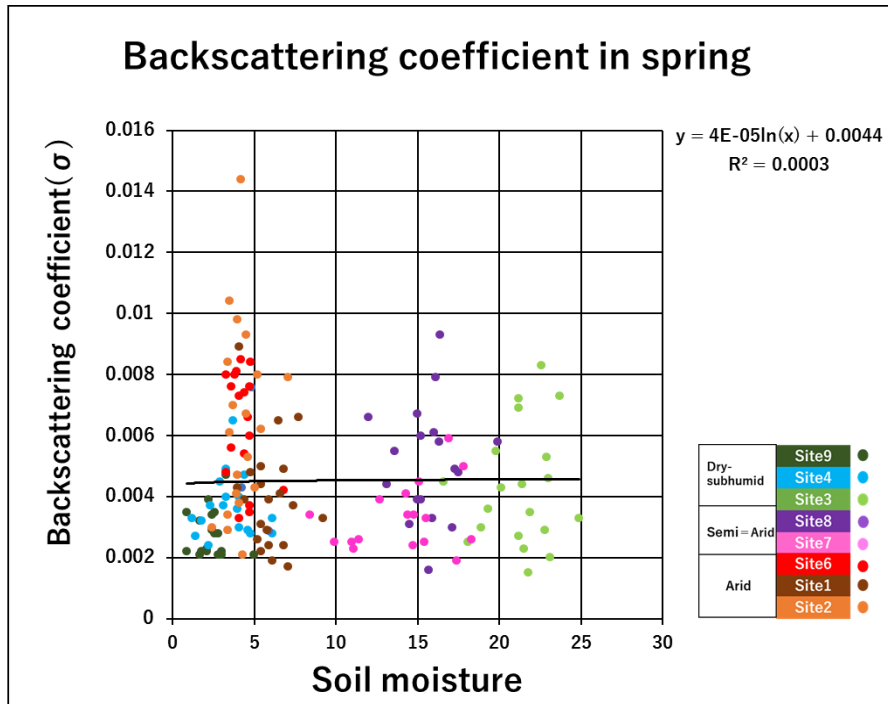


Fig. 29 Soil moisture changes of site9-site6 in summer and spring seasons (2019).

3.3.2.2 現地計測の土壌水分量と後方散乱係数との関係

Fig. 30 は両季節に於ける現地調査で測定した土壌水分量と、同地点・同時期の後方散乱係数の関係を表したものである。結果として春季はやや正の相関を示し、夏季は負の相関を示した。先行研究 (Nakaegawa et al, 1998) のように土壌水分量の増加に伴う関数的な増加はあまり見られなかった。半湿潤地域の草原の Site9,4 の春季は土壌水分量が 1~5% と低く、後方散乱係数も 0.02~0.06dB と低い。夏季は土壌水分量が 10~15% と高まり後方散乱係数の最大値はおよそ 0.01dB と高い。しかしこれは土壌水分量の影響ではなく夏季は植物の存在がマイクロ波に干渉した影響により高くなり、春季は植生が無く剥きだしの地表面粗度の影響であると考えられる。今回使用した Sentinel-1 の C バンド (波長 5.6cm) 合成開口レーダー (C-band SAR instrument) は植物の枝で散乱しやすい特性があり、土壌水分を検知する地表の観測には不向きである。土壌水分をより詳細に測定するためには植物の葉や枝を通過し地表面の観測に優れている L バンド (Alos-2 の場合 L バンドで、波長約 24 cm) が搭載されている衛星のデータを使うことが望ましい。

(a)



(b)

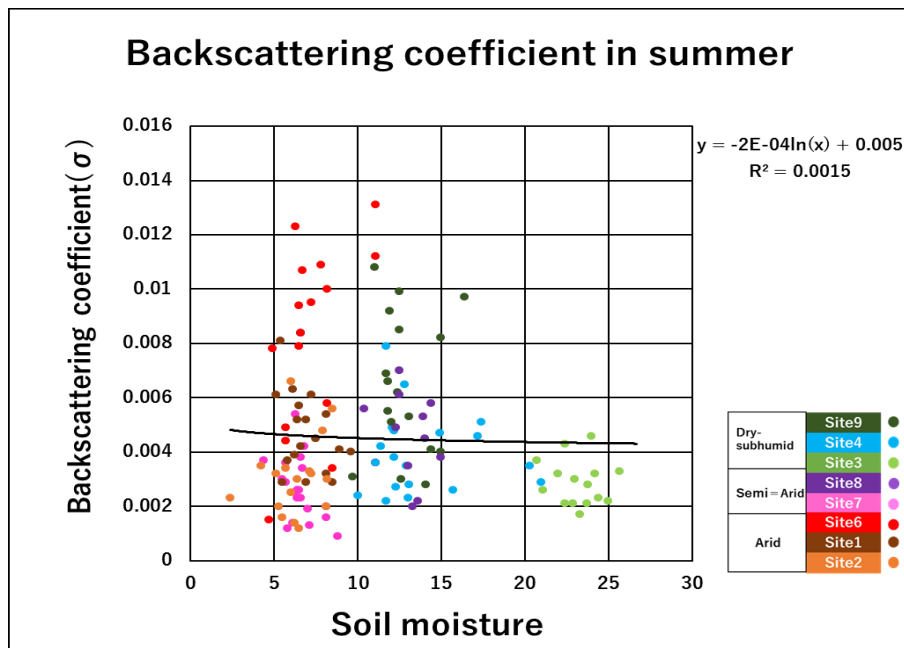


Fig. 30 The linear correlation between the backscatter coefficient and soil moisture (Where, (a) in spring season (2019); (b) in summer season (2019)).

3.3.3 合成開口レーダーの結果のまとめ

マイクロ波衛星を用いた研究では、半湿潤、半乾燥地域の後方散乱係数を算出した。マイクロ波の後方散乱とは地表面の粗度と土壌水分によって変化するため、後方散乱係数を用いて植物の有無による季節性、成長の度合い、土壌水分の変化を観測することができる。半湿潤地域の夏季は春季より後方散乱係数の値が高く、半乾燥地域では両季節とも大きな変化は見られなかった。半湿潤地域では、春季は枯れ草が多く地表面に残存しているが、雨季を迎えた後の夏季には草原に多く生育する一年生植物の草本類が成長するため、マイクロ波に干渉し後方散乱が発生したと考えられる。一方、半乾燥地域では春季、夏季とも残存して生育する多年生植物の灌木類が多く、一年生植物は半湿潤地域と比較して変化は少ない。そのため後方散乱の季節性が見られず、ゴビの植物の安定した地表面状態が反映されたと考えられる。以上のことから半湿潤地域は植物の成長の影響による季節性がみられる特徴を示し、半乾燥地域では季節性はみられず、後方散乱係数は土地状態を反映していると示唆された。

3.4 空間分布特性

本研究では北部のウランバートル近郊の調査地から南部のゴビ砂漠の都市ダランザドガドまで約 700 km に及ぶ広域なスケールを対象としている。ここでは各調査地の経度，緯度的空間分布特性を明らかにする。対象とするサンプルは NDVI と後方散乱係数を用いる。解析には $\textcircled{C}\text{GS}+$ Geostatistics for the Environmental Sciences (ジーエスプラス) を用いた。

3.4.1 バリオグラムモデル

バリオグラムモデルとは各計測ポイントの構造をモデル化したものである。これは空間に散らばる各計測ポイント同士の相関関係（空間的自己相関）を表したものであり、「近くにあるものは遠くにあるものより似る」という地理的原則を定量的に評価したものである。ここで求められる各計測ポイントに於ける空間的自己相関の散らばりをセミバリエンス (Semivariance) と呼び、日本語では「半分散」, 「準分散」と訳される。セミバリエンスは (6) の式から計算される。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=0}^{n(h)} \{z(x_i + h) - z(x_i)\}^2 \quad (6)$$

$\gamma(h)$: 間隔距離 h に関するセミバリエンス (共分散関数)

$z(x)$: 地域化変数

x_i : 観測点 i のサンプル値

$x_i + h$: 観測点 $i + h$ のサンプル値

$n(h)$: ラグ間隔 h に関するサンプル数の総数

Kohsaka (1998) により式 (6) は以下のように説明されている. ここでは必要な項目のみ抜粋して説明する. この式 (6) は, 一定の距離 (または時間) だけ離れた位置にある応答値の差 (Fig. 31) の 2 乗の平均 (つまり分散) がセミバリエンス (共分散関数) となる (Kohsaka, 1998). 複数のサンプルの値を式 (6) から得た場合, これらの値をプロットすると, Fig. 32 のようなバリオグラム雲が得られる. バリオグラム雲は距離が長くなるにつれて観測値の相違度を示すバリオグラムも大きくなる. しかしある値以上の距離になると, バリオグラムは変化せず一定になる.

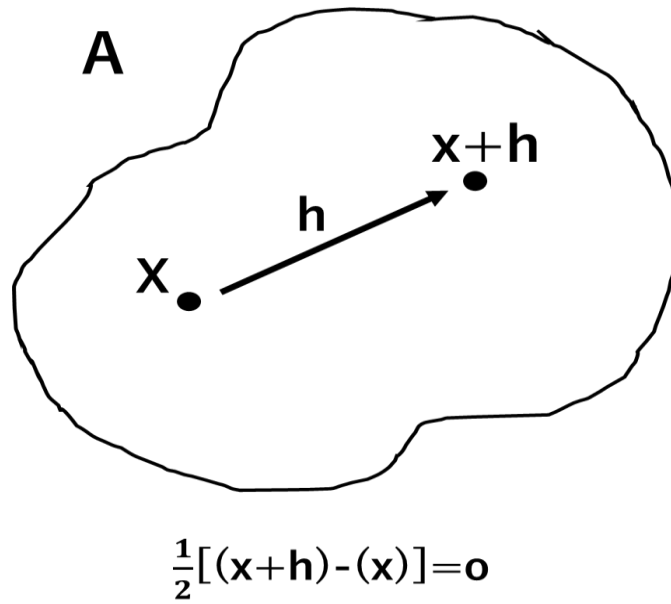


Fig. 31 Two points x and $x + h$ separated by the distance vector h in region A (Kohsaka, 1998).

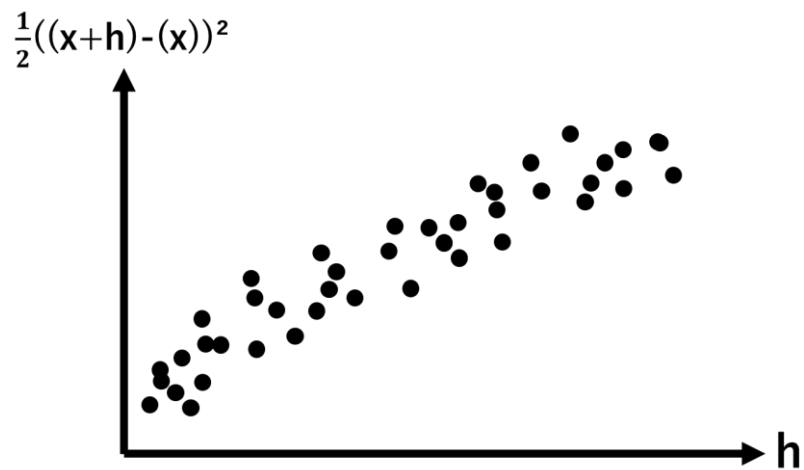


Fig. 32 Variogram cloud: The degree of difference with respect to the spatial distance h is plotted (Kohsaka, 1998).

3.4.2 セミバリオグラムのモデル

セミバリオグラムは計測したサンプル値の空間的自己相関を表す。空間的自己相関とは地域に於ける事象が周辺の地域に於ける事象の影響を受け、相互作用することである。Fig.32 はセミバリオグラムのモデル図である。このモデルはレンジ (Range), シル (Sill), ナゲット分散 (Nugget Variance) の三つの項を用いてモデル化される。

セミバリオグラムのモデルからは、ある距離でモデルが一定になることがわかる。モデルが始めに平坦になる距離がレンジである。レンジより近い距離に位置するサンプルは空間的自己相関が高い（影響を受けている）。レンジよりも遠い距離に位置すると空間的自己相関は低くなる（影響を受けていない）。セミバリオグラムがレンジに達する値（影響を受けなくなる距離）をシルと呼ぶ。ナゲットは距離がゼロの位置に於いて、セミバリアンスがゼロではなくすでに値を持っている状態である。この状態をナゲット効果と呼ぶ。

セミバリオグラムのモデルは一般的に四つの基本モデルで定式化される (Fig.33)。球形モデル (Spherical Isotropic Model) は、2 次関数を修正したものであり、レンジ α で空間的自己相関はなくなりセミバリオグラムは漸近線に達する。つまりある距離に到達した途端に空間的自己相関はまったく存在しないことを表している。指数モデル (Exponential Isotropic Model) は、徐々にシルに接近するが現実には収束することは無い（シルが存在しない）。つまりこのバリオグラム

に含まれる全範囲に於いて空間的自己相関が存在する．線形モデル (Linear Isotropic Model) は直線のバリオグラムである．このモデルは指数モデルと同じく収束することは無い．またレンジ α は存在しない．ガウスモデル (Gaussian Isotropic Model) は指数モデルと似ているが y 切片が緩やかに上昇しシルに接近する．つまり指数モデルよりサンプル同士の相互作用は強い．

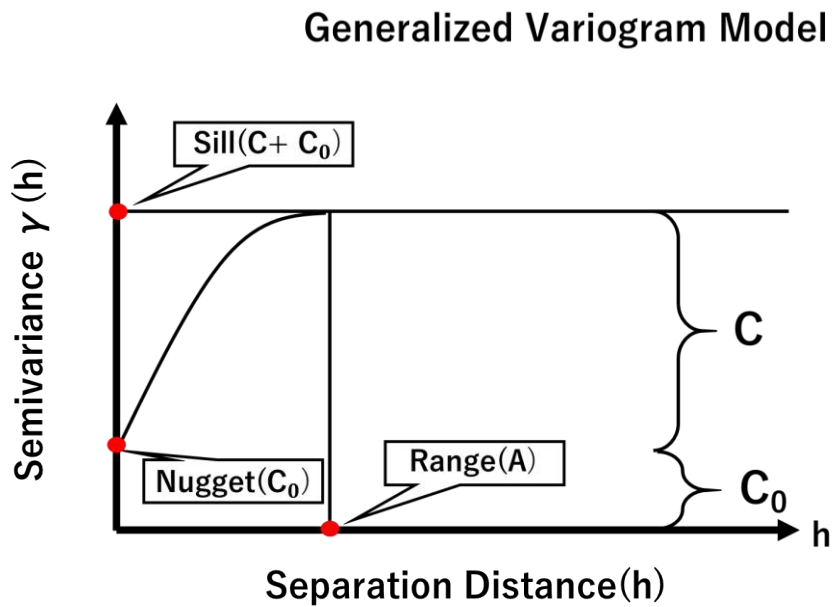


Fig. 33 Semivariogram structure.

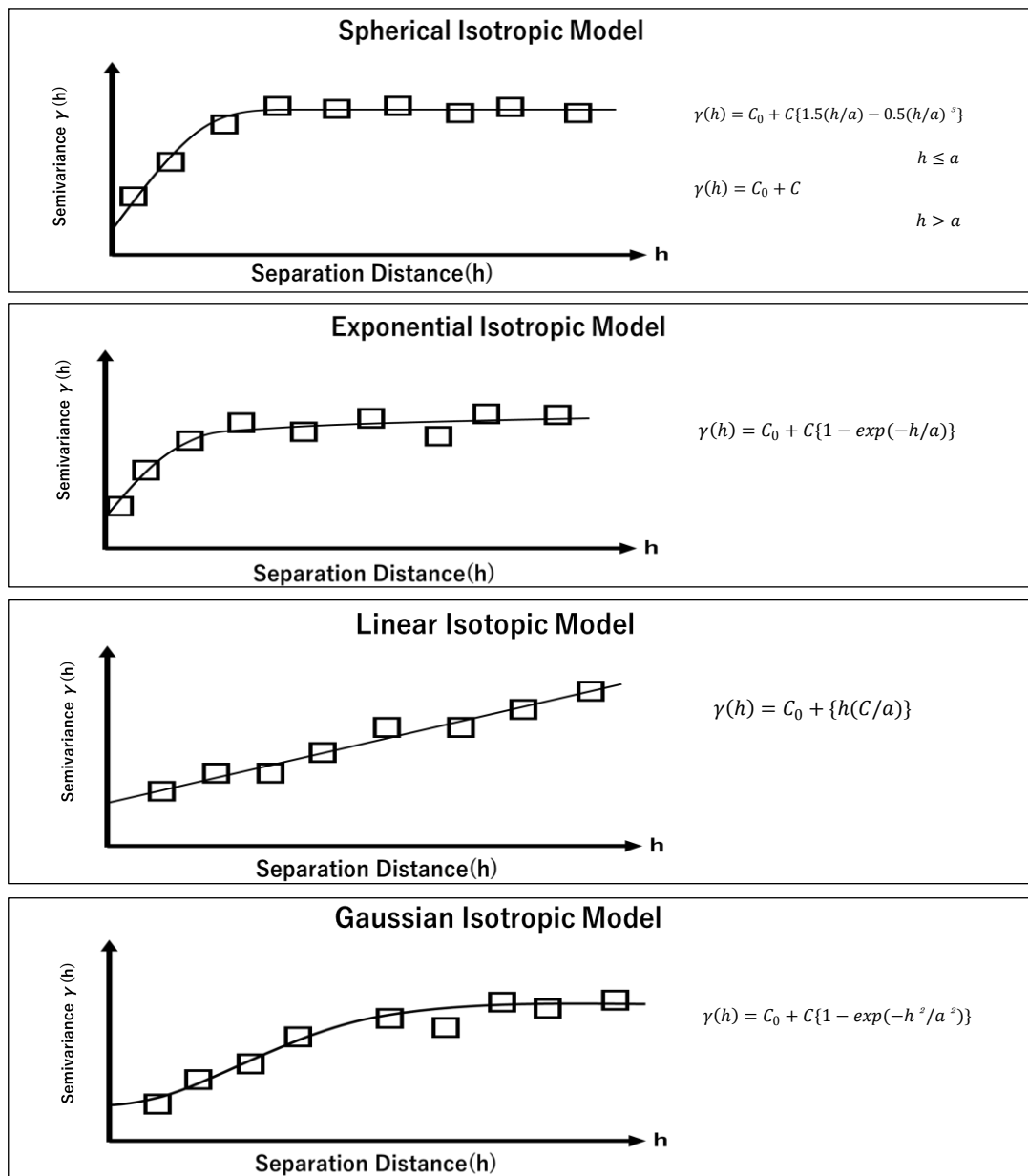


Fig. 34 Four types of models in the semivariogram.

3.4.3 セミバリオグラムの結果 (NDVI)

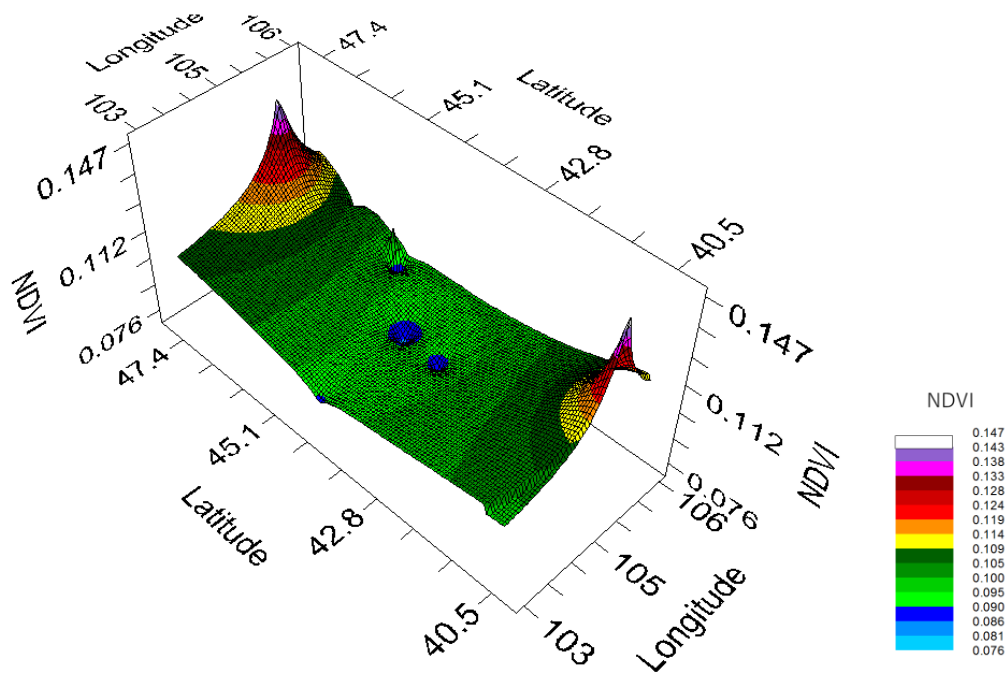
ここでは春季，夏季両季に於ける NDVI と後方散乱係数のセミバリオグラムに加え，各調査地のサンプル値を位置情報（経度・緯度）で表した立体モデルも用いる．これは調査地のサンプル値を基に，各調査地の間の値を推定することにより，経度，緯度に於ける方位的特性を三次元的に表したモデルである．なお NDVI と後方散乱係数は Site(250 m²)スケールで抽出したものをを用いる．

Fig. 35 は春季の NDVI のセミバリオグラムである．立体モデルでは南部の草原と北部の砂漠でほかの地域（中部の半乾燥地域）より高いことがわかる．砂漠が高い理由として，ゴビ地域の植物の展葉が 5 月頃に起こるためだと考えられる．ただこのモデル図は視覚的に見やすいよう誇張されて表示しているため，各サンプル値に注目してみるとその差は大きいわけではない．サイト間に距離があり，調査地点が連続していないために，セミバリエンスはややデータの散らばりはあるがきれいな球形モデルを表している．春季は植生がほぼ存在しない草原のサイトから灌木類がパッチ状に点在する砂漠へと景観が変わる特徴を表していると考えられる．Fig. 36 は夏季の NDVI のセミバリオグラムである．立体モデルは春季より NDVI の値は高いが構造はほぼ変わらない．調査地は一定間隔に配置されていない，また連続していないため，このような極端なモデルになったと考えられる．セミバリエンスは球形モデルを表している．春季とは異なりバリオグラム雲（サン

ブルの散らばり) が二つ存在している。グラフの y 軸左側の雲は草原の特徴を表し、右側の雲は砂漠の特徴を表していると考えられる。基準となる草原の Site9 から南下すると徐々に空間的自己相関が減る。やがて砂漠の灌木類がパッチ状に点在する場所に於いて相関は消え、それらによる別パターンの相関関係が生まれることによりこのような分散になったと考えられる。春季の砂漠でも灌木類が存在するが NDVI が低いことに加え、灌木類同士の間は土壌が剥きだしの状態である。草原は植物が少なく土壌の NDVI を反映するため、草原と砂漠で大きな差がないと考えられる。NDVI のセミバリオグラムは春季、夏季とも球形モデルの特徴を示した。これは湿潤地域の草原と半乾燥、乾燥地域の砂漠の NDVI に於ける空間的自己相関はそれぞれ異なることを示している。

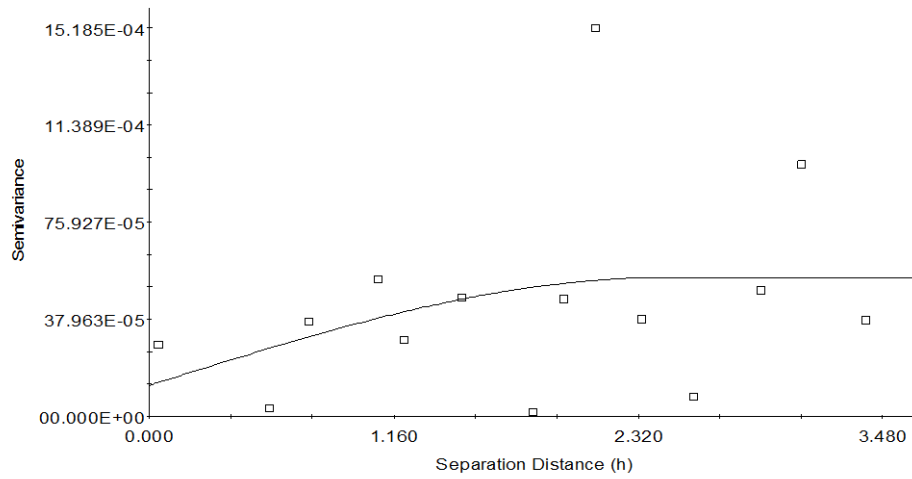
(a)

NDVI(spring)



(b)

Spring NDV(spring) : Isotropic Variogram



Spherical model ($C_0 = 0.000121000$; $C_0 + C = 0.000542000$; $A_0 = 2.43$; $r_2 = 0.104$;
RSS = $1.802E-06$)

Fig. 35 (a) the estimation result of NDVI based on the measurement data ; , and (b) is a semi-variance of NDVI estimation in spring season (2019).

Fig. 36 (a) the estimation result of NDVI based on the measurement data; and (b) is a semi-variance of NDVI estimation in summer season (2019).

3.4.4 セミバリオグラムの結果 （後方散乱係数）

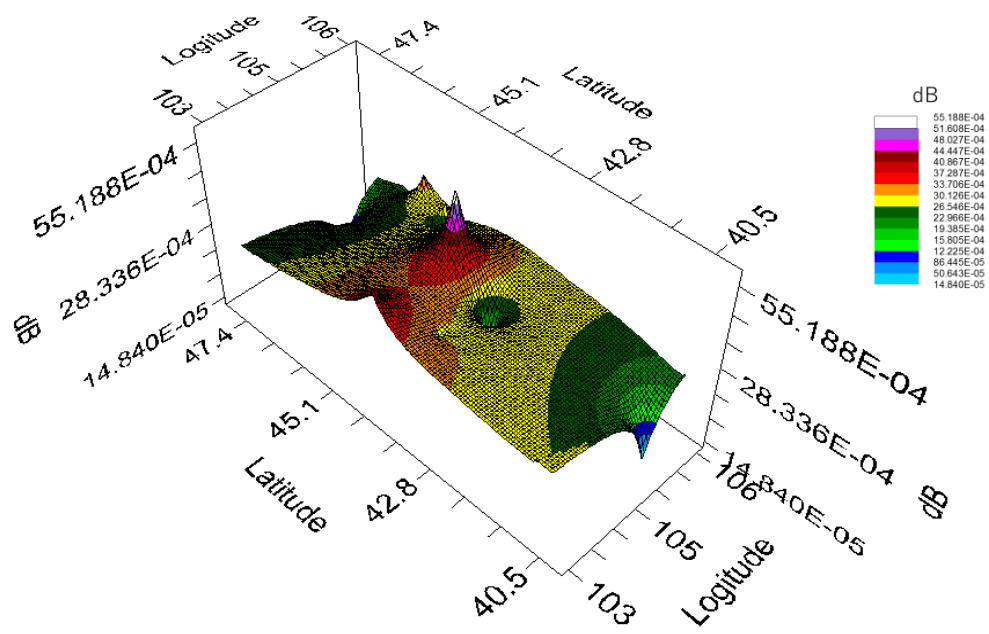
Fig. 37 は春季の後方散乱係数のセミバリオグラムである．立体モデルは中部の半乾燥地域の後方散乱係数が高く表示されている．北部の草原はマイクロ波に干渉する植物が少ないため，後方散乱が発生しにくい．半乾燥地域や乾燥地は灌木類が残存する影響により後方散乱が発生し，このようなモデルになったと考えられる．バリオグラムの雲は上下に二つ存在している．これは各調査地に於いて測定した値が一樣ではなく，低い値，高い値の上下のバラつきが存在し，それぞれの空間的自己相関が存在する．後方散乱係数が低い値の空間的自己相関は地表面粗度，高い値は残存した植物による後方散乱係数だと考えられる．夏季の草原は植物が地面を覆うため，このような分散はみられない．総合的に春季のセミバリオグラムは指数モデルを示した．これは空間的自己相関が徐々に減少し続けることを表す．

Fig. 38 については，夏季の立体モデルは夏季の NDVI のモデルと似た形となっている．これは植生の有無による季節性により，後方散乱係数も変動するため似たモデルとなる．セミバリオグラムの序盤は徐々に空間的自己相関が減少しているが，再び相関が強くなる山形の分布をしている．前回の項で説明した Fig. 24 から草原の Site9 と砂漠の Site6 の後方散乱係数は他のサイトと比べ高く，その値も近い．そのため y 軸左側（距離がある程度はなれた場所）で再び空間依存が復活したと考えられる．総合的にガウスモデルの空間的自己相関とな

った．ガウスモデルは基準となる調査地から距離が近い所で強い空間依存が存在する．これは草原の Site9, 4, 3 の特徴を示し，半乾燥地域からは徐々に依存が低下することを表す．後方散乱係数の春季，夏季のセミバリオグラムはシル（空間的自己相関が存在しない段階）が存在しない特徴がある．

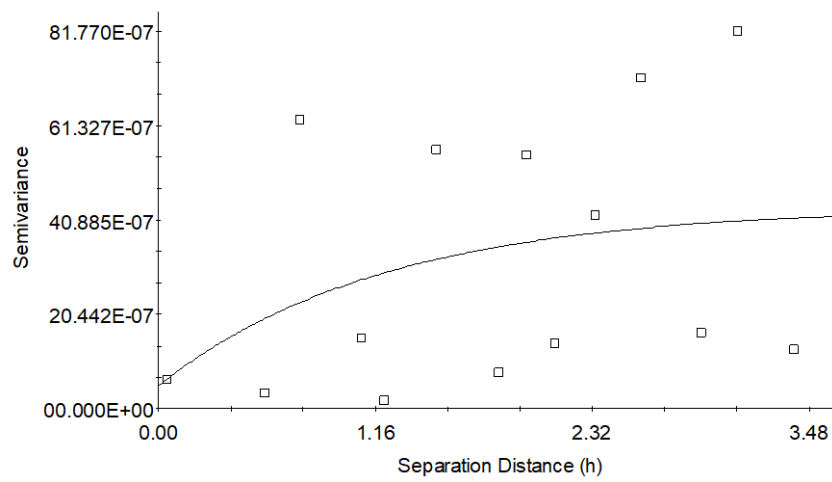
(a)

dB(spring)



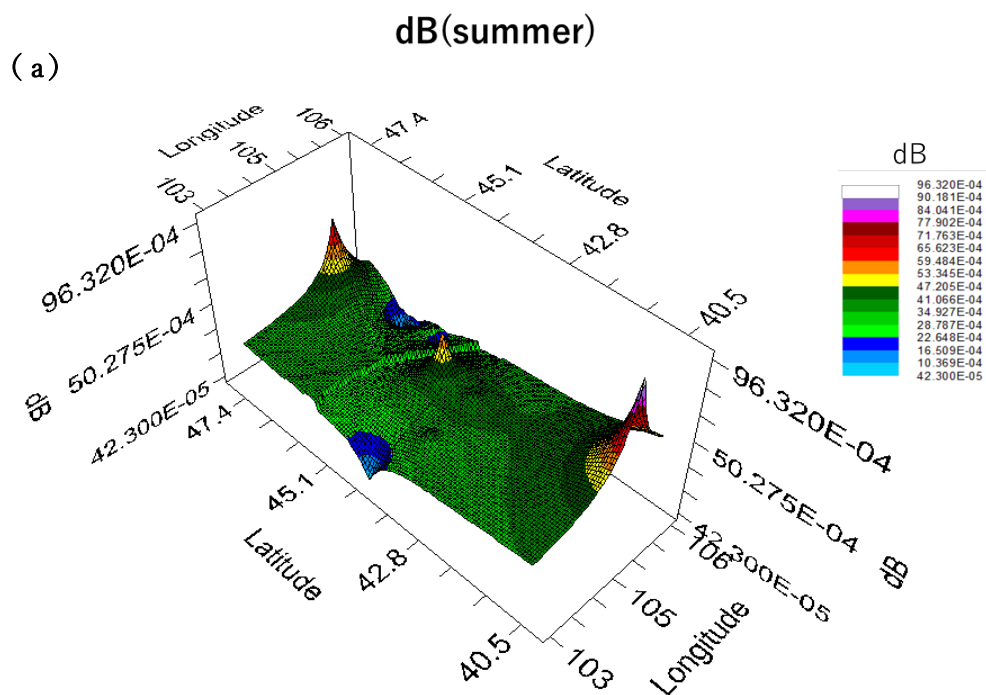
(b)

dB(spring): Isotropic Variogram

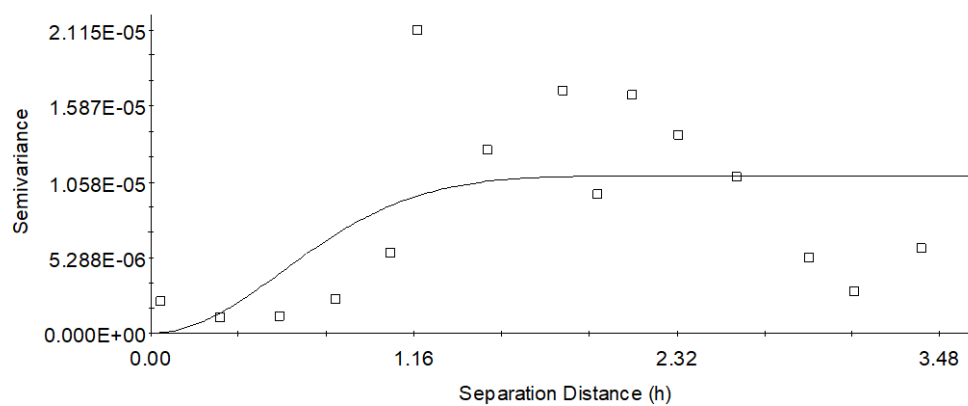


Exponential model (Co = 0.0000005000; Co + C = 0.0000043600; A0 = 1.21; r2 = 0.125;
RSS = 9.078E-11)

Fig. 37 (a) the estimation result of dB based on the sites satellite data, and (b) is a semi-variance of dB estimation in spring season (2019).



(b) **dB(summer): Isotropic Variogram**



Gaussian model ($C_0 = 0.000000010$; $C_0 + C = 0.000011020$; $A_0 = 0.82$; $r^2 = 0.351$;
RSS = 3.828E-10)

Fig. 38 (a) the estimation result of dB based on the site satellite data, and (b) is a semi-variance of dB estimation in summer season (2019).

第 4 章 まとめ

4. 1 マイクロ波衛星後方散乱係数の傾向

マイクロ波衛星の後方散乱係数を用いた研究では、半湿潤、半乾燥地域の後方散乱係数を算出した。半湿潤地域の草原の夏季は春季より後方散乱係数の値が高く、半乾燥地域では両季節とも大きな変化は見られなかった。草原に多く生育する一年生植物の草本類は春季には枯れ草しか地表面に存在しないが、雨季を迎えた後の夏季には多く成長するため、マイクロ波に干渉し後方散乱が生じたと考えられる。一方半乾燥地域では春季、夏季とも残存して生育する多年生植物の灌木類が多く、一年生植物は半湿潤地域と比較して少ない。そのため後方散乱の季節の変化がなく、ゴビの植物の季節的安定した地表面状態が反映されたと考えられる。以上のことから半湿潤地域は植物の成長の影響による季節性がみられる特徴を示し、半乾燥地域では季節性はみられず、土地状態が後方散乱係数に影響した違いが見られた。また本研究では土壌水分量による後方散乱係数の影響を評価できる結果を示せていない。そのため土壌水分量による影響をより詳細に測定するため、植物の葉や枝を通過し地表面の観測に優れている L バンド（波長約 24 cm）が搭載されている衛星画像を使用することが今後の発展に繋がると考える。モンゴル国の地表面粗度をマイクロ波で観測する上で、春季は植生の影響が少なく地表面粗度の観測に適している。夏季は植生による地表面状態の観測に適しているためこれらのことを考慮してリ

モートセンシング技術による観測が望まれる。

4.2 セミバリオグラム・データの距離との関係

NDVI のセミバリオグラムは夏季，春季とも，空間的自己相関が，ある距離から減少する球形モデルを示した．これは半湿潤地域から乾燥地に南下すると草原から徐々に半乾燥地の植生の景観に移行し，途中から半乾燥地域の植生の景観から変化していない傾向を示す．

後方散乱係数のセミバリオグラムは，春季は指数モデル，夏季はガウスモデルで示された．共通点は全対象範囲に於いて空間的自己相関が存在する．しかし季節によりモデルの特徴が異なることから，マイクロ派に干渉する植生の有無が影響していると考えられる．

4.3 光学センサを用いた植生パッチパターンの解析

光学センサを用いた植生パッチパターンの解析では，半湿潤地域は縞模様のパターンを示し，半乾燥地域からは多年生植物の灌木類の影響による斑模様のパターンが見られた．以上の結果からモンゴルの草原植生の空間分布パターンは半湿潤，半乾燥地域の二つの特徴がある．本研究では衛星画像からパッチパターンを評価する手法として NDVI を用いたが，パッチのスケールがどの植物種，群落に該当するのかに

についての定量的評価は行っていないため、これらの問題の解明には、高解像度の衛星画像や UAV による空撮画像などのリモートセンシング的手法からも評価は可能である。今後パッチパターンのより詳細な研究にはこれらの技術が加わることが望まれる。

4.4 モンゴル国の土地利用と環境問題

ここでは本研究結果を用いて今後モンゴル国で懸念される環境問題へ関係することについて述べる。

半湿潤地域の草原は植生が地表を覆う状態であるため、僅かな外部影響が加わることがあっても生態系崩壊が急激に加速することはない。一方半乾燥地域のゴビは灌木類のパッチ同士の距離が保たれることにより安定している状態（草原生態系ネットワーク）である。そのため僅かな影響（壊滅的攪乱・この場合過放牧や土地開発、気候変動などが該当する）により生態系ネットワークの崩壊は典型草原より崩壊しやすく脆弱である。この灌木類によるパッチは、ゴビの固有の動物の生息地を担っているほか、げっ歯類、爬虫類の隠れ家となり砂漠に生息する虫類の重要な住处として半乾燥地域の様々な生態系を担う。また砂漠で生活をする遊牧民の家畜の餌でもある。もし土地開発をする際に、生態系への影響を考慮するのなら、典型草原とは異なりより慎重に行わなくてはならない。モンゴル国ではすでに、主要幹線道路沿

いの過放牧による土地劣化の例が存在する(Nakamura , 2013). 今後のモンゴルに於いて, 経済的発展に伴う土地利変化により改変された土地を再生する活動も行われると考えられる. その場合半乾燥地域で土地再生の植林を行うのなら, 半乾燥地域に適した植物(主に灌木類)を植生パッチパターンの原則に則り行うのが望ましいと考える. 大地を覆う植物種を一様に植えた場合, 砂塵の発生は抑えることができて, 元の灌木類による生態系ネットワークを利用とする生物は戻らず, ビオトープの役わりを果たさない極端な生態系を生み, また別の環境問題を引き起こすと考えられる.

また, 広域に於ける植生状態の動向のモニタリングをする際, 草本類, 灌木類のパッチパターンに注目することにより, その土地が外部影響に多少耐えられる状態なのか, あるいは脆弱な状態なのかを評価する方法として植生パッチパターンは有効であると考えられる.

Abstract

Detection of the spatial distribution pattern of Mongolian
grassland vegetation using optical and microwave satellite
imagery

Keita Shima

【Background and objectives】

Mongolia is located in the eastern part of Eurasian Continent. Gobi desert area is spread out to the in the south of Mongolia. The climate is a typical continental steppe climate, low precipitation and the features is a large temperature difference between summer and winter, also difference between the day and night. In the traditional lifestyle of Mongolian nomads' lives, nomads follow a seasonal routine raising and breeding livestock, migrating from place to place following the most favorable pastures and campsites. However, in recent years, there are concerns about pasture degradations due to changes in land use by the development of the market economy and changes lifestyle. Therefore, vegetation monitoring is required monitoring is required. In the grasslands of the northern dry sub-humid rareas where the annual average annual precipitation is 200 mm to 300 mm, an annual plants grows and

covering in summer, but dead from the autumn to the winter. There are differences in the landscape depend on the season. On the other hand, in the southern semi-arid areas where the annual average precipitation is about 100 mm to 200 mm, perennial shrubs are scattered in spots and remain in spring of the following year. Therefore, there is not much difference in the landscape doesn't depending on season. There are few research cases that quantitatively evaluates the differences in landscapes over wide areas (Sofue , et al). Therefore, it is important to elucidate the landscape characteristics and vegetation distribution patterns over a wide area in Mongolia, where there is concern about changes in land use due to economic development in the future. The purpose of this study is to elucidate the vegetation distribution pattern in dry sub-humid areas and semi-arid areas using optical and microwave satellites data.

【Methods】

1. In order to clarify the vegetation distribution pattern based on the difference in each landscape and precipitation zones, the NDVI (normalized difference vegetation index) of each survey site was calculated by Sentinel-2 data. We created a model of vegetation distribution patterns based on the NDVI obtained at

each site, and compared it by focusing on regularity and similarity latitude and longitude .

2. In order to clarify the difference in the ground surface condition in the dry sub-humid areas and semi-arid areas, the backscattering coefficient was calculated by the SAR (Synthetic Aperture Radar) of the Sentinel-1 microwave satellite. The result shown, backscattering coefficient of study sites are determined by the surface condition, such as the characteristics of the ground surface condition (roughness), vegetation condition seasonality, and soil moisture etc.

【Results】

In the elucidation of vegetation distribution pattern using optical sensors, it was possible to demonstrate a variation by using NDVI similar to the vegetation variation pattern in response to precipitation shown in previous studies (Max Rietkerk et al, 2004). The mainly an annual plants are grows in the grasslands in dry sub-humid areas and their plants show high NDVI values (0.1 to 0.5), and generated striped pattern, no patch pattern is generated, because the annual herbs are distributed to full cover the earth

surface. In the semi-arid areas of the Gobi, many perennial shrubs using deep groundwater but does not depend on precipitation. Although the NDVI values of Gobi plants are low (0.1 or less than), because Gobi plants are scattered on the sand, so generated a striped pattern. From these results, the spatial pattern of Mongolian grassland vegetation has two different characteristics in dry sub-humid areas and semi-arid areas. In semi-arid Gobi, the distance between shrubs is constant and the distribution is more stable. As a result, ecosystem networks tend to collapse with little disturbance, and land development and regeneration require more attention than typical herbaceous meadow.

In the second half of this study we using microwave satellites data, the backscattering coefficient (β_0) of the sub-humid areas and semi-arid areas was calculated. Since the change of microwave backscattering depends on the ground surface roughness and soil moisture, the presence or absence of plants, the degree of growth, and changes in soil moisture can be observed of using the backscattering coefficient. In the grasslands of the dry sub-humid area, the value of the backscattering coefficient was higher in summer than in spring, and in the semi-arid area, no significant change was observed in both seasons. The herbs of an annual plants

that grow abundantly in grasslands had only dead grass on the ground surface in spring, but since they much grow in summer after the rainy season, they interfered with microwaves and caused backscattering. On the other hand, in semi-arid areas, there are many perennial shrubs that survive and grow in both spring and summer, and but annual plants are fewer than in semi-humid areas. Therefore, it is considered that the seasonal change of backscattering is small in Gobi region, and the stable ground surface condition of Gobi plants is reflected. In the semi-humid areas, the distribution of herbaceous plants that depended on precipitation was seasonal characteristics; and the distribution of Gobi plants that did not depend on precipitation was not seasonal characteristics. Seasonal changes in backscatter indicate the surface condition itself.

謝 辞

JSPS 科研費および酪農学園大学学内共同研究費の助成で行われたものである。

本研究を進めるにあたり、終始ご指導とご助言を頂きました指導教官である星野仏方教授に心より感謝申し上げます。また現地に同行し、調査に於いて多大なご協力を頂きました Dorj Munkhjargal 様、Tsedendamba Purevsuren 様、ZoloJargal EnkhTuvshin 様、Tian Ying 様、Tsogtbayr Dashima 様、千葉舜也 様、清水優那 様、に深く感謝いたします。またパンデミック（新型コロナウイルスの世界的蔓延）の影響により現地調査の中止、研究の停滞など非常に辛く困難な状況でしたが、最後まで応援して下さいました方々に心から感謝いたします。

参考文献

- 1) TIAN YING. 2018. 2007～2018 年のモンゴルの乾燥地域における植生の気温と降水への応答. 酪農学園大学修士論文.
- 2) 祖父江侑紀. 2015. ゴビ砂漠の黄砂発生地域における植生変動のモニタリング. 酪農学園大学修士論文.
- 3) 出村雄太. 2015. モンゴル国ゴビ砂漠におけるダストストーム発生時の地表面状態の分析. 酪農学園大学修士論文.
- 4) 仲江川敏行. 沖大幹. 虫明功臣. 1998. 土壌水分量を既知とした後方散乱係数からの地表面粗度の逆推定について 粗度因子の提案. 水文・水資源学会誌, 11(6): 603-606.
- 5) 小澤智弘. 羽柴秀樹. 園部雅史. 2017. Sentinel-1 衛星を用いた SAR 画像データによる河川氾濫時の浸水域の推定. 平成 29 年度日本大学理工学部 学術講演会予稿集, H5-18: 541 - 542.
- 6) 田殿武雄. 小池俊雄. 1999. 地表面粗度特性を考慮した SAR による土壌・積雪パラメータ推定のための数値シミュレーション. 水文学論文集, 第 43 巻: 217 -222.
- 7) 石塚直樹. 大内和夫. 2017. 合成開口レーダの農業への応用. Journal of the Remote Sensing Society of Japan, Vol137 No.3: 182 -192.
- 8) 会田健太郎. 2017. 衛星搭載型多偏波 SAR を用いた土壌水分分布評価手法の開発と ALOS/PALSAR への適用 博士論文.

- 9) 福本昌人．2008. マイクロ波の後方散乱係数と積雪水量との関係．農業農村工学会論文集，256(76-4)：359 - 366.
- 10) 高坂宏之．1999. クリギングとその地理的応用．日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要，No.34：27 - 35.
- 11) 藤田昇．2003. 草原植物の生態と遊牧地の持続的利用 植物学からみたモンゴル高原．科学，73：563 - 569.
- 12) 仲村洋．2020. モンゴルの遊牧と自然災害〈ゾド〉 ゴビ地域の脆弱性に関する実証的研究，第1版．明石書店．
- 13) 石井祥子．鈴木康弘．稲村哲也．2015. 草原と都市 変わりゆくモンゴル，第1版．風媒社．
- 14) 藤田昇・他．2013. 「モンゴル」草原生態系ネットワークの崩壊と再生（環境人間学と地域），京都大学学術出版．
- 15) 金岡秀郎．2000. 「モンゴルを知るための65章」（エリア・スタディーズ），明石書店．
- 16) 小長谷有紀・他．2004. 「現代モンゴルを知るための50章」（エリア・スタディーズ），明石書店．
- 17) Borjigin Burensain．2015. 「内モンゴルを知るための60章」（エリア・スタディーズ），明石書店．
- 18) 司馬遼太郎．2017. 街道をゆく5〈新装版〉モンゴル紀行，第4版．朝日新聞出版．
- 19) Buho Hoshino．2013. The Nomadic Life of Mongolian

Plateau Under the Global Climate Changes.

- 20) Max Rietkerk. Stefan C Dekker. Peter C. de Ruiter.
Johan van de Koppel. 2004. Self-Organized Patchiness and
catastrophic Shifts in Ecosystems. www.sciencemag.org
SCIENCE VOL305.
- 21) J.von Hardenberg. E.Meron. M.Shachak. Y.Zarmi.
Diversity of Vegetation Patterns and Desertification.
2001. PHYSICAL REVIEW LETTERS vol87 No19.
DOI;10.1103/PhysRevLett.87.198101.
- 22) Yuki Sofue. Buho Hoshino. Yuta Demure. Kenji Kai. Kenji
Baba. Eunice Nduatai. Akihiko Kondon. Troy Sternberg.
2018. Land doi:10.3390/land7010019.
- 23) Soil Moisture Retrieval Using Synthetic Aperture
Radar(SAR)data. 2015. Chiba University SAEID GHARECHELOU.
- 24) Alexandre Bouvet. Marie Ballere. Thuy Le toan. 2018.
Use of the SAR Shadowing Effect for Deforestation
Detection with Sentinel-1 Time Series. 2018. Article in
Remote Sensing DOI;10.3390/rs10081250.